

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

APLICAÇÃO DO MODELO QSWAT PARA SIMULAÇÃO
HIDROLÓGICA E DE CENÁRIOS DE USO E OCUPAÇÃO
DO SOLO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS
RIBEIRÕES PAIVA E SANTA MARIA (DF/GO).

RAFAEL DE SÁ BARCELLOS

ORIENTADOR: RICARDO TEZINI MINOTTI

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL

BRASÍLIA/DF: JULHO/2019

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

Aplicação do modelo QSWAT para a simulação hidrológica e de cenários de uso e ocupação do solo das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).

RAFAEL DE SÁ BARCELLOS

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

**RICARDO TEZINI MINOTTI, DsC (ENC/UnB)
(ORIENTADOR)**

**LEONARDO ZANDONADI MOURA, MsC (ENC/UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**CARLO RENAN CÁCERES DE BRITES, MsC (CAESB/DF)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, JULHO DE 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

BARCELLOS, RAFAEL DE SÁ	
APLICAÇÃO DO MODELO QSWAT PARA SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E DE CENÁRIOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIBEIRÕES PAIVA E SANTA MARIA (DF/GO).	
xi, 81 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2019)	
Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.	
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.	
1. Ribeirão Paiva e Santa Maria (DF/GO)	2. Modelagem Hidrológica
3. Uso e ocupação do solo	4. Modelo SWAT
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BARCELLOS, R.D.S. (2019). Aplicação do modelo QSWAT para simulação hidrológica e de cenários de uso e ocupação do solo das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO). Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 81 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Rafael de Sá Barcellos

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Aplicação do modelo QSWAT para simulação hidrológica e de cenários de uso e ocupação do solo das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2019

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Rafael de Sá Barcellos

Rua 17 Norte, Lote 03, Residencial The Park – Águas Claras.

71910-540 – Brasília/DF, Brasil.

rdsbambiental@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a Deus pelo dom da vida, por estar presente em todas as etapas da graduação, me dando sabedoria, discernimento e força para que pudesse tomar decisões da maneira mais sábia e prudente possível;

Aos meus pais, Junior e Cilene, por todo amor incondicional, apoio e cuidado ao longo de todos os ciclos da minha vida, afinal, a jornada da vida só foi possível graças aos dois; ao meu irmão, Leonardo, por toda inspiração de vida, apoio, companheirismo e opiniões relativas ao trabalho;

A minha cunhada, Larissa, por todo ombro amigo, pela presença e por todo diferencial que fez em minha vida desde seu primeiro dia nela; à minha pequena Olívia e ao meu grande Artur por me darem o amor mais sincero do mundo e mudar minha vida;

Aos meus avós maternos, José e Anair, que, embora não estejam presentes fisicamente, cuidam da minha pessoa todos os dias e, em outro plano, comemoram essa conquista comigo; aos meus avós paternos, Joelpe e Dilma, por todo apoio prestados, a casa sempre aberta para o almoço e os cochilos entre uma aula ou outra e por sempre reconhecerem o esforço feito por mim;

Ao meu melhor amigo, Jonatas, por todas as risadas, por todo apoio e por toda presença em minha vida;

A minha namorada, Ana Gabriela, por toda paciência, cuidado, amor, reciprocidade e compreensão durante a jornada desse trabalho, acompanhando todas as minhas vitórias e derrotas de perto;

Aos grandes amigos e amigas que fiz durante o curso, que colaboraram com risadas, com companheirismo e com sua amizade sincera: Murilo Fonseca, Klalbert Jacome, Gabriel Cotrim, Paulo Aires, Lucas Taraleskof, Lucas Nunes, Rommel Lucas, Gabriel Antero, Leonardo Mendes, Bernardo Vereza, Jales Bussinguer, Victoria Gomes e Ananda Oliveira;

Por fim, agradeço ao meu orientador Ricardo Tezini Minotti por toda ajuda e conhecimentos ao longo dessa jornada e ao colega Gilliard Nunes por todo tempo disponibilizado e conhecimentos trocados para a realização do projeto.

RESUMO

Bacias hidrográficas são unidades de planejamento ambiental que apresentam grande dinâmica em seus processos, tornando-se foco da gestão ambiental por seu alto valor e por responderem direta e indiretamente a quaisquer alterações, sejam elas fisiográficas ou nos diversos ecossistemas que as compõe. Uma bacia hidrográfica pode apresentar alterações de ordem natural ou antrópica. A primeira corresponde a processos associados ao ecossistema e que independem de qualquer tipo de estímulo antrópico para acontecerem, todavia, a segunda corresponde à resposta da bacia hidrográfica frente às atividades antrópicas. Diversas atividades antrópicas podem ser citadas como prejudiciais à uma bacia hidrográfica, todavia, destaca-se que alterações de uso e ocupação do solo apresentam maior preponderância para gerarem impactos ambientais negativos. Com o intuito de compreender melhor como as alterações de uso e ocupação do solo influenciam uma bacia hidrográfica, pode-se utilizar a modelagem hidrológica como ferramenta. Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo a realização da modelagem hidrológica, utilizando o modelo SWAT, como forma de aproximação inicial para com a bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO). A metodologia adotada baseou-se na obtenção de conhecimentos fisiográficos da bacia através da caracterização morfométrica e simulações hidrológicas utilizando a interface QSWAT. As simulações foram realizadas para o período dos anos de 2009 a 2013, considerando uma distinção em simulação sem calibração e com calibração. Os resultados das simulações foram utilizados para obter os parâmetros mais sensíveis do modelo, que estavam associados à recargas dos aquíferos raso e profundo, capacidade de água disponível no solo, saturação do solo e condutividade hidráulica. A calibração mais significativa do modelo, feita utilizando o algoritmo SUFI-2, para os anos de 2009 a 2011, retornou como valor do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,30, considerado como insatisfatório de acordo com Moriasi *et al*(2007). Os cenários de uso e ocupação do solo simulados foram realizados considerando um ambiente totalmente preservado e outro totalmente urbano, apresentando resultados satisfatórios para as vazões que saem do exutório da bacia. Por fim, concluiu-se que o modelo apresentou aplicação para uma aproximação inicial da bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).

Palavras-chave: Ribeirão Paiva e Santa Maria (DF/GO); Modelagem Hidrológica; Uso e Ocupação do Solo, Modelo SWAT.

SUMÁRIO

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. OBJETIVO GERAL.....	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. BACIA HIDROGRÁFICA E CICLO HIDROLÓGICO	4
3.1.1. Balanço Hídrico.....	9
3.1.2 Efeitos do uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas	10
3.2. HIDROGEOMORFOLOGIA.....	11
3.2.1. Parâmetros morfométricos para análise de bacias hidrográficas	12
3.3 PLANEJAMENTO E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS.....	19
3.3.1 Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Brasil	20
3.3.2 Gestão da Qualidade da Água no contexto de uso e ocupação do solo	21
3.4 MODELOS HIDROLÓGICOS	22
3.4.1 Evolução dos Modelos Hidrológicos.....	23
3.4.2 Classificação dos Modelos Hidrológicos	24
3.4.3 Integração entre Modelos Hidrológicos e Sistemas de Informações Geográficas (SIG)	27
3.5 MODELO SWAT.....	28
3.5.1 Aspectos gerais do modelo SWAT.....	30
3.5.2 Equacionamento básico do SWAT	32
3.5.3 Calibração e Validação	33
3.6 ESTUDOS PRÉVIOS SOBRE AS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIBEIRÕES PAIVA E SANTA MARIA (DF/GO)	35
4. METODOLOGIA.....	37
4.1. ÁREA DE ESTUDO	39

4.1.1 Localização Geográfica	39
4.1.2 Clima.....	39
4.1.3 Declividade	41
4.1.4 Geomorfologia.....	42
4.1.5 Pedologia	43
4.1.6 Hidrologia	45
4.1.7 Uso e ocupação do solo	46
4.2. ESTRUTURAÇÃO DA BASE DE DADOS	46
4.3 CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE MORFOMÉTRICA	48
4.4 SIMULAÇÕES.....	48
4.4.1 Análise de Sensibilidade e Calibração	49
4.4.2 Cenários.....	53
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
5.1 CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE MORFOMÉTRICA DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	56
5.2 MODELAGEM COM O MODELO SWAT.....	58
5.2.1 Sub-bacias hidrográficas e Unidades de Resposta Hidrológicas (URHs)	58
5.2.2 Simulação Inicial	59
5.2.3 Análise de sensibilidade	60
5.2.4 Calibração	63
5.2.5 Simulações com calibração.....	68
5.2.6 Cenários	69
6. CONCLUSÕES.....	74
7. RECOMENDAÇÕES.....	76
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1.1 Componentes de uma bacia hidrográfica. Fonte: EPA, 1998.	5
Figura 3.1.2 Ciclo Hidrológico. Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2016).....	8
Figura 3.1.3 Esquematização genérica do balanço hídrico. Fonte: Adaptado, Abbaspour et al. (2015).....	10
Figura 3.2.1 Modelos conceituais de três interações entre a Geomorfologia, Hidrologia e a Hidrogeomorfologia: a) sobreposição, b) intersecção e c) nova ciência. Fonte: Goerl, 2012.	12
Figura 3.2.2 - Hierarquia fluvial proposta por Horton (1945) (A) e Strahler (1952) (B). Fonte: Christofolletti (1980).	14
Figura 3.2.3 Magnitude Fluvial definida por Scheidegger (1965) (C) e Shreve (1966) (D). Fonte: Christofolletti (1980).	15
Figura 3.2.4 Curva hipsométrica (Mm), integral hipsométrica (superfície Mom) e altura média (oh). Fonte: Christofolletti (1980).....	18
Figura 3.4.1 Descrição de um modelo genérico. Fonte: Rennó & Soares (2000).....	24
Figura 3.4.2 Estrutura geral de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs). Fonte: Câmara Neto (1995).	27
Figura 3.6.1 Fluxograma da metodologia de trabalho.....	38
Figura 4.1.1 Mapa de localização geográfica das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).	39
Figura 4.1.2 Classificação Climática de Koppen para o Goiás (GO) e Distrito Federal (DF). Fonte: Cardoso <i>et al.</i> (2014).	40
Figura 4.1.3 Mapa de declividade das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria.....	42
Figura 4.1.4 Mapa Geomorfológico das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).	43
Figura 4.1.5 Mapa pedológico das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria.	44
Figura 4.1.6 Mapa hidrológico das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria	45
Figura 4.1.7 Mapa de uso e ocupação do solo das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).	46

Figura 4.4.2 Mapa de uso e ocupação do solo alterado para a construção do cenário preservado das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).....	54
Figura 4.4.3 Mapa de uso e ocupação do solo alterado para a construção do cenário antropizado das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).....	55
Figura 5.1.1 Curva e Integral Hipsométrica da sub-bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO)	57
Figura 5.2.1 Mapa de localização das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria.....	59
Figura 5.2.2 Hidrograma simulado inicialmente das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).....	60
Figura 5.2.3 Hidrograma obtido na calibração inicial da bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).....	61
Figura 5.2.4 Resultados da Análise de sensibilidade do modelo SWAT para as bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).	61
Figura 5.2.5 Hidrograma comparativo entre a vazão simulada sem calibração e as vazões das bacias hidrográficas Alagado Montante Corumbá, Cachoeirinha, Santana, Ponte Alta e Alagado.	64
Figura 5.2.6 Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do ribeirão Ponte Alta (DF).....	67
Figura 5.2.7 Precipitação média mensal da bacia hidrográfica do ribeirão Ponte Alta (DF)	68
Figura 5.2.8 Hidrograma - bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).	68
Figura 5.2.9 Hidrograma de vazões simuladas com e sem calibração das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).	68
Figura 5.2.10 Hidrograma comparativo de cenários das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).....	69
Figura 5.10.11 Balanço hídrico do cenário antropizado das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).....	71
Figura 5.10.12 Balanço hídrico do cenário preservado das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).....	72
Figura 5.10.13 Balanço hídrico da condição atual da bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.2.1 Distribuição dos parâmetros morfométricos conforme as classes propostas por Christofolletti (1980)	13
Tabela 3.4.1 Classificação dos modelos hidrológicos. Fonte: Lewis (2002).	25
Tabela 3.5.1 Alterações e melhorias do modelo a cada versão lançada. Fonte: Arnold <i>et al</i> (2009).....	30
Tabela 4.1.1 Classificação de declividade. Fonte: Embrapa (1979)	41
Tabela 4.1.2 Quantitativo de área das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) associados a classificação de declividade proposta por Embrapa (1979).	41
Tabela 4.2.1 Descrição dos dados utilizados	47
Tabela 4.4.1 Parâmetros utilizados para calibração e seus respectivos intervalos máximos e mínimos de variação. Fonte: Ferrigo (2014).	51
Tabela 4.4.2 Classificação da performance de calibração utilizando coeficiente NSE para passo mensal. Adaptado de Moriasi <i>et al.</i> (2007).....	52
Tabela 5.1.1 Valores dos parâmetros morfométricos para a bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).....	56
Tabela 5.2.1 Valores de p-value obtidos na calibração inicial	62
Tabela 5.2.2 Estação fluviométricas verificadas próximas às bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).....	63
Tabela 5.2.3 Valores máximos e mínimos dos parâmetros mais sensíveis após a melhor calibração	66
Tabela 5.2.4 Parâmetros obtidos após a calibração final (melhor calibração) comparados com os valores obtidos por Ferrigo (2014).....	63

LISTA DE EQUAÇÕES

(1) Balanço hídrico simplificado	9
(2) Balanço hídrico	9
(3) Relação de bifurcação	15
(4) Relação entre o comprimento médio dos canais de cada ordem	15
(5) Relação entre o gradiente de canais	16
(6) Índice de sinuosidade	16
(7) Índice de circularidade	16
(8) Densidade de rios	17
(9) Densidade de drenagem	17
(10) Relação entre as áreas das bacias	17
(11) Coeficiente de manutenção	17
(12) Índice de rugosidade	18
(13) Balanço hídrico calculado pelo modelo SWAT	33
(15) Coeficiente de Nash-Sutcliffe	52

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ADASA	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal
ANA	Agência Nacional de Águas
ARS	Agricultural Research Service
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CREAMS	Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems
CX	Cambissolo Háplico
EPA	Environmental Protection Agency
EPIC	Environmental Policy Integrated Climate
DF	Distrito Federal
GLEAMS	Groundwater Loading Effects of Agricultural Management System
GLUE	Generalized Likelihood Uncertainty Estimation
GO	Goiás
HSPF	Hydrological Simulation Program Fortran
LVAd	Latossovo Vermelho-Amarelo distrófico
LVd	Latossovo Vermelho distrófico
MCMC	Markov chain Monte Carlo
MDE	Modelo Digital de Elevação
MG	Minas Gerais
MUSLE	Equação Universal de Perda de Solo Modificada
NSE	Coefficiente de Nash-Sutcliffe
PARASOL	Parameter Solution
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PSO	Particle Swarm Optimization
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SUFI-2	Sequential Uncertainty Fitting Algorithm
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SWAT-CUP	SWAT Calibration and Uncertainty Procedures
SWM	Stanford Watershed Model
SWMM	Storm Water Management Model
SWRRB	Simulator for Water Resources in Rural Basins
URH	Unidade de Resposta Hidrológica
USGS	United States Geology Survey
USLE	Equação Universal de Perda de Solo
WGN	Weather Generator Data
ZEE	Zoneamento Ecológico-Econômico

1. INTRODUÇÃO

A água é um dos principais recursos naturais responsáveis pela dinâmica da natureza, apresentando papel fundamental no que tange os ciclos biogeoquímicos, manutenção dos ecossistemas e perpetuação da vida. Em função de sua importância, o principal questionamento que tem abarcado as discussões que a envolvem pauta-se em sua disponibilidade frente ao crescimento populacional e o acelerado desenvolvimento econômico que toma o mundo em diversas localidades.

O crescimento populacional e o aumento de demandas por água, associados a períodos com valores mais baixos de precipitação, levaram o Brasil em períodos recentes, assim como outros países do mundo, a passar por episódios de crise hídrica em diferentes regiões, que demonstraram a necessidade de que as águas, tal como sua utilização, passassem a ser fonte de debates, elaboração de políticas públicas e outras medidas que visem integrar o desenvolvimento econômico e social de maneira sustentável.

Nesse contexto, as bacias hidrográficas tornam-se unidades caracterizadas por uma grande quantidade de processos geodinâmicos de alta complexidade e que apresentam respostas diretas frente às alterações antrópicas. Essas alterações podem apresentar diversas origens, tais como: despejos de efluentes de elevada carga orgânica por fontes pontuais, alteração da capacidade do fluxo de água e vazão disponível em função de captações, alterações do uso e ocupação do solo por atividades agrícolas, com consequente e geração de cargas de poluentes difusas, ou por expansão urbana, dentre outras. Nesse contexto, o manejo integrado das bacias hidrográficas tem-se apresentado como uma alternativa para o intermédio entre a utilização da água e os impactos ambientais negativos gerados.

A gestão das águas no Brasil apresentou um marco importante com a instituição da Lei Federal N° 9.433, de 8 de janeiro de 1997, popularmente conhecida como “Lei das Águas”, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, que estabeleceu os instrumentos para a gestão dos recursos hídricos com caráter descentralizador – por instituir um sistema nacional que permitiu a integração entre União e estados – e participativo – por unir usuários e sociedade civil através dos comitês de bacias hidrográficas. Em seu artigo 1º, inciso IV, a lei dispõe que a gestão dos recursos hídricos deve proporcionar o uso múltiplo das águas, de modo que os conflitos que envolvam a água e sua utilização sejam resolvidos da melhor maneira, considerando a manutenção e propiciação do recurso frente à solução.

A PNRH reforça a necessidade de se possuir um amplo conhecimento das bacias hidrográficas e dos usos da água, embora, a depender da escala da bacia hidrográfica – sub bacias ou microbacias – a obtenção de dados torna-se escassa, colaborando com uma problemática dos recursos hídricos: bacias hidrográficas não monitoradas. Tal problema diz respeito a quantidade limitada ou ausência de dados de uma bacia hidrográfica (independentemente de sua escala), que impacta diretamente o planejamento e a gestão ambiental da mesma, em função da não disposição de um banco de dados que permitam nortear os usos da bacia e os desdobramentos do uso.

Dessa forma, uma opção recorrente utilizada em bacias hidrográficas não monitoradas, é a modelagem hidrológica. A utilização da modelagem hidrológica é uma ferramenta que permite gerar cenários, resultados com base em adaptações probabilísticas, dentre outras, que sirvam como instrumento de tomada de decisão frente à gestão dos recursos hídricos.

A bacia hidrográfica do presente trabalho, que abarca os ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) adentra o rol de bacias hidrográficas não monitoradas, onde, diante do contexto de crise hídrica vivenciado nos últimos anos, crescentes expansões urbanas e variações abruptas de uso e ocupação do solo em função de atividades antrópicas, torna-se uma bacia de sumo interesse para o estudo com enfoque voltado à gestão ambiental a partir da modelagem hidrológica. Atualmente, a bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) tem se tornado foco de discussões em função do ofício n° 44/2016 enviado pela Agência Nacional de Águas (ANA) ao Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba, solicitando a alteração da classe de enquadramento do ribeirão Santa Maria (DF/GO) para a classe IV, que, de acordo com a resolução CONAMA n° 357/2005 é definida como uma classe de uso menos abrangente e com baixíssima qualidade, com uso restrito a navegação e harmonia paisagística.

Diante do supracitado, o presente trabalho é um estudo de caráter de primeira aproximação que visa compreender como as alterações de uso e ocupação do solo considerando a situação atual e cenários preservados e de exacerbada concentração urbana afetam a dinâmica hidrológica da bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) através da modelagem hidrológica utilizando o modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tools*), com utilização da interface QSWAT.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Realizar a simulação hidrológica por meio da aplicação do modelo SWAT para as bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) considerando cenários de uso e ocupação do solo.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Efetuar a caracterização ambiental e análise morfométrica as bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria;
- Realizar a modelagem hidrológica das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) pela aplicação do modelo SWAT;
- Realizar a simulação hidrológica de diferentes cenários de uso e ocupação do solo para as bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. BACIA HIDROGRÁFICA E CICLO HIDROLÓGICO

Tucci (2002) afirma que o termo bacia hidrográfica é utilizado para designar uma área natural de captação de água precipitada que converge para um único ponto de saída – exutório, sendo composta por superfícies vertentes e uma rede de drenagem com cursos d'água que confluem até chegar à um leito do exutório. Pode-se considerar a bacia hidrográfica como um sistema físico, tal que o volume precipitado é a entrada do sistema e volume de água que é escoado pelo exutório é a saída do sistema, considerando os processos de evaporação, evapotranspiração e infiltração como perdas intermediárias.

Santana (2003) refere-se ao termo bacia hidrográfica como uma região de compartimentação natural demarcada por divisores de água, onde o escoamento da água ocorre de cotas mais altas para cotas mais baixas.

Silva *et al* (2004) apontam para a importância das bacias hidrográficas em função de suas características naturais, onde, tornaram-se unidades de gerenciamento e conservação de recursos, com maior enfoque para situações onde há predomínio do conflito entre o crescimento e desenvolvimento populacional em detrimento ao meio ambiente.

Santos (2004) afirma que a adoção de bacias hidrográficas como unidades de planejamento e gestão apresentam consenso mundial, dado que se trata de um sistema natural e com interações integradas.

De acordo com Santana (2003) adotar bacias hidrográficas como unidades de planejamento e gerenciamento, além de unidade de estudo dinâmico, permite que o diagnóstico e, por conseguinte, o prognóstico, possam ocorrer mais facilmente. A Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 001/1986, Artigo 5º, inciso III, estabelece que áreas que serão impactadas por algum projeto ou empreendimento apresentem limites geográficos bem definidos, tal como sua área de influência, além de correlacionar o projeto, seus impactos ambientais e área com bacias hidrográficas locais ou que estejam próximas ao projeto. Além disso, a Lei Federal nº 9433, de 08 de janeiro de 1997, instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que se baseia, de acordo com o Artigo 1º, inciso V, no fundamento de que a bacia hidrográfica é dada como uma unidade territorial para a execução da PNRH e execução do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH).

Santos (2004) estabelece que, comumente, a dimensão da bacia hidrográfica influencia os resultados, de modo que, espera-se, bacias hidrográficas menores apresentem um planejamento facilitado, à medida que conforme sua dimensão aumenta, seu planejamento torna-se mais complexo. Diante disso, é possível dividir uma bacia hidrográfica em unidades menores, a priori das potencialidades, fragilidades e vulnerabilidade que ocorrem na área.

Porto & Porto (2008) destaca que a escala a ser utilizada para a bacia hidrográfica é uma função do problema a ser trabalhado, com isso, o tamanho ideal da bacia hidrográfica é considerado àquele que abarca a problemática de interesse, sendo um conceito sistêmico adaptado aos sistemas de gestão de recursos hídricos. A Figura 3.1.1 ilustra uma bacia hidrográfica genérica.

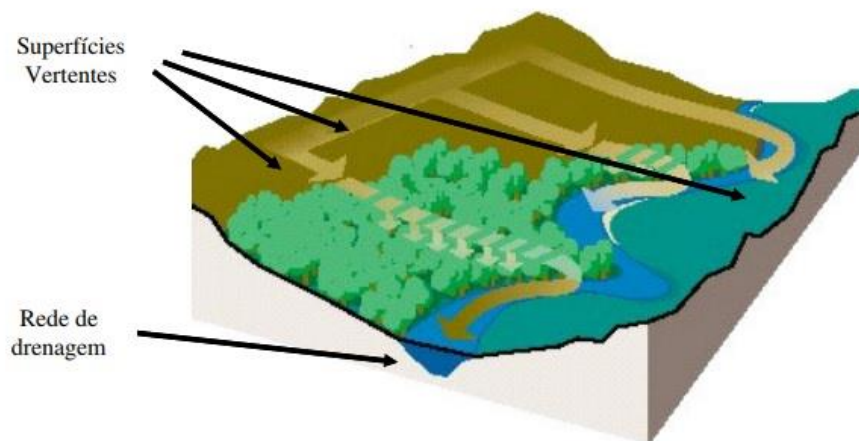


Figura 3.1.1 Componentes de uma bacia hidrográfica. Fonte: EPA, 1998.

De acordo com Ward & Robinson (2000), a quantidade total de água na Terra está distribuída em três formas (sólida, líquida e gasosa) que estão alocadas em três reservatórios principais: os oceanos, os continentes e a atmosfera, onde apresentam circulação constante – Ciclo Hidrológico. Sabe-se que a água nas formas líquida e gasosa é responsável por cobrir mais de dois terços da superfície terrestre, com destaque para a água em forma gasosa que é uma constituição variável da atmosfera. Camargo (2005) aponta para o fato de que a água em condições de vapor de água, apresenta maior concentração em regiões tropicais e em camadas mais baixas da atmosfera.

Portanto, a água constitui-se de moléculas que estão em constante atração pela força de coesão. As moléculas de água que estão no estado líquido apresentam movimento constante, verticalmente no sentido da atmosfera terrestre e horizontalmente quanto à superfície

terrestre. O grau de agitação das moléculas relaciona-se de maneira proporcional à temperatura que a água está submetida. Assim, acréscimos de temperatura implicam que as moléculas de água mais agitadas da superfície escapem da massa líquida, ficando livres na atmosfera na forma gasosa. Todavia, se a temperatura for reduzida, por conseguinte, a movimentação das moléculas de água diminui. Se a temperatura atingir zero graus celsius, as moléculas fixam-se e a água se solidifica, formando o gelo.

Assim, o ciclo hidrológico constitui-se de uma sucessão de processos naturais pelos quais a água passa até retornar a seu estado inicial.

Righetto (1998) traduz o ciclo hidrológico como os processos de: evaporação, precipitação, detenção, escoamento superficial, infiltração, percolação da água no solo e aquíferos, escoamento fluvial e as interações entre todos esses processos. Tucci (2002) afirma que o ciclo pode ser entendido como um fenômeno global onde ocorre a circulação de água, de forma fechada, entre atmosfera e a superfície terrestre, impulsionada principalmente pela energia solar, que serve de fonte para elevar a água da superfície até a atmosfera e à gravidade terrestre que permite com que ocorra o retorno da água condensada através da precipitação. A seguir tem-se uma descrição proposta por Righetto (1998) do ciclo hidrológico.

A precipitação, que ocorre em forma de chuva, é dada através da aglutinação e crescimento de gotículas, em nuvens que contenham uma parcela significativa de vapor de água (umidade) e núcleos que permitam sua condensação – poeira ou gelo. Com isso, forma-se uma quantidade elevada de gotas de chuva com tamanho e peso de modo que a força da gravidade seja maior que a turbulência ou movimentos ascendentes na atmosfera. Quando o vapor de água é convertido em cristais de gelo que apresentam peso e tamanho suficientes, a precipitação pode ocorrer sob a forma de granizo ou neve. Destaca-se que no caminho das gotas para a superfície terrestre durante a precipitação, ocorre a evaporação, de modo que em certas regiões a taxa de evaporação pode ser elevada, vaporizando totalmente a precipitação.

Ao atingir a superfície terrestre, o volume precipitado pode cair em um solo que apresente cobertura vegetal, com isso, parte do volume é capturado pelas folhas e caules e a outra parte evapora. Ao se atingir o limite de armazenamento pela superfície vegetal, ou pelo deslocamento em função da ação dos ventos, a água que fora detida pela vegetação pode ser precipitada novamente para o solo. A água ao atingir o solo pode seguir caminhos diversos. Dado que o solo é um meio poroso, parte da água que o atinge pode infiltrá-lo, ocorrendo

até que o solo atinja sua capacidade máxima de saturação. Salienta-se que o processo de infiltração começa na superfície inicial do solo, todavia, continua se estendendo pelas camadas de maior profundidade, assim, quando o solo atinge sua capacidade máxima de saturação, o processo de infiltração é reduzido. A parcela de água excedente da infiltração é responsável pelo escoamento superficial. Ressalta-se que o processo de infiltração, tal como a percolação no interior do solo, é regido pelas tensões capilares dos poros e pela força da gravidade. A umidade que está presente no solo é realimentada pela infiltração, fazendo com que parte da água infiltrada seja absorvida pelos vegetais que a devolvem para a atmosfera pelo processo de transpiração. Por fim, a parcela não absorvida pelos vegetais é percolada para o lençol freático.

O escoamento superficial ocorre em direção às cotas mais baixas, tendo como principal forçante a gravidade. Inicialmente, o escoamento superficial é marcado por pequenos filetes de água que se adequam a forma do relevo do solo. Com isso, tem-se a erosão das partículas do solo pelos filetes de água que, em função da topografia e relevo do solo, corroboram para a formação de uma microrede de drenagem convergente para cursos d'água de maior estabilidade. Destaca-se que a presença da vegetação na superfície do solo dificulta o escoamento superficial à medida que favorece o processo de infiltração. Além disso, a vegetação é responsável por reduzir a energia cinética produzida pelo impacto das gotas de chuva no solo, minimizando o processo erosivo.

Ocasionalmente, parte da água que é escoada pela rede de drenagem atinge o oceano. Nos oceanos a circulação de água ocorre através da interação entre processos físicos e meteorológicos de elevada complexidade, dentre eles: ventos de superfície, marés, variações espaciais e temporais da energia solar e rotação terrestre. Independentemente do local onde ocorre a circulação de água na superfície terrestre, tem-se a evaporação para a atmosfera, sendo o processo de evaporação que marca o fechamento do ciclo hidrológico. A evapotranspiração é a soma da parcela de evaporação e da transpiração da vegetação, sendo influenciada pela radiação solar e tensões de ar e vento.

Brutsaert (2005) afirma que a evapotranspiração é o processo de maior importância no ciclo hidrológico, dado que, normalmente, sua magnitude supera a dos outros processos, tal como escoamento superficial e variação da umidade do solo. O autor afirma ainda que a evapotranspiração pode chegar a aproximadamente 70% do volume total precipitado. Zhang *et al.* (2001) apontam, também, que a evapotranspiração é o processo de maior influência – em escala anual – para mudanças hidrológicas a partir de alterações da vegetação.

A evapotranspiração é afetada pelo clima, de modo que quanto maior a radiação solar líquida incidente – expressa pelo albedo -, maior será a transpiração. Além disso, uma elevação na quantidade de processos advectivos, com maior acentuação turbulenta para o fluxo atmosférico, maior será a evapotranspiração. Zhang *et al.* (2001) expuseram a diferença da evapotranspiração considerando diferentes tipos de vegetação e níveis de precipitação, correlacionando a evapotranspiração e a precipitação. Para climas áridos, a evapotranspiração regula-se a partir da quantidade de água disponível no solo, o que é uma função da capacidade de armazenamento do solo. Todavia, para climas úmidos a evapotranspiração será regulada pelos processos advectivos e quantidade de energia líquida. Allen *et al.* (1998) afirmam que a área foliar e profundidade das raízes são as características mais importantes da fisionomia da vegetação relativas à evapotranspiração.

Tundisi (2003) destaca que todos os estados da água (sólido, líquido ou gasoso) compõe o ciclo hidrológico de forma dinâmica, todavia, o estado líquido é tido como mais importante em virtude de ser o estado da água onde se apresenta próprio para utilização imediata. Além disso, destacam ainda que o ciclo hidrológico é impulsionado pela energia solar, força dos ventos, que são responsáveis pelo transporte do vapor d'água para os continentes, força da gravidade, que é responsável pelo processo de precipitação, infiltração e o deslocamento da água. A Figura 3.1.2 apresenta, esquematicamente, o ciclo hidrológico.

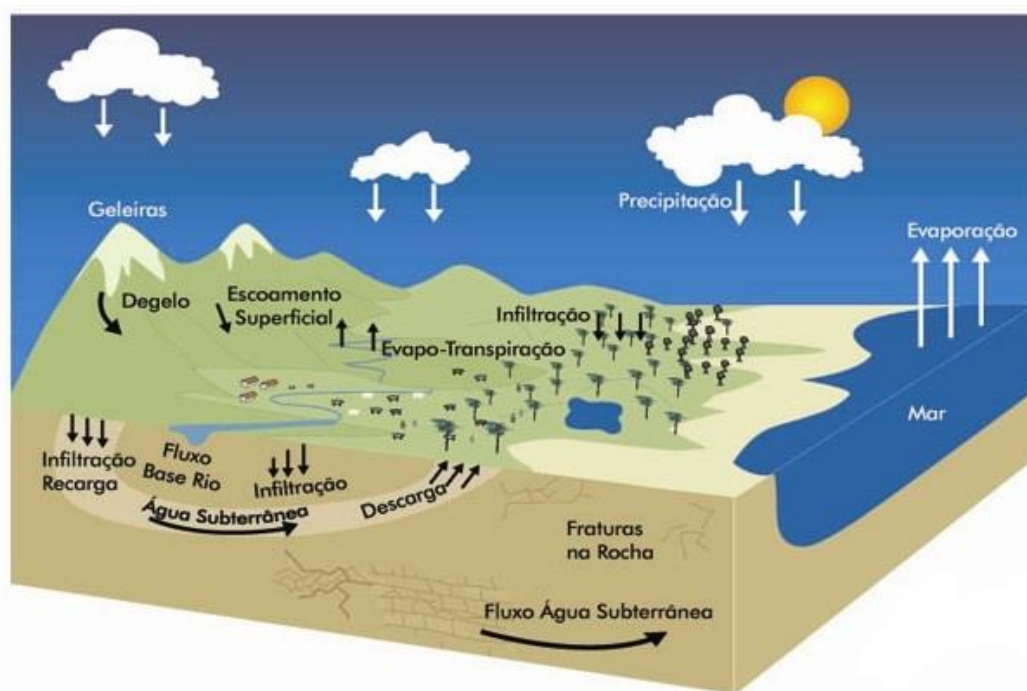


Figura 3.1.2 Ciclo Hidrológico. Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2016)

De acordo com Santana (2003), as áreas de infiltração podem ser denominadas como áreas de recarga, que, ao sofrerem degradação ambiental em virtude de ações antrópicas ou processos naturais – a exemplo do processo erosivo intempere – possuem uma alteração na sua capacidade de evapotranspiração, gerando escoamentos superficiais exacerbados que transportam sedimentos para grandes reservatórios, resultando em poluição e assoreamento. O autor destaca ainda que em virtude dos fenômenos supracitados há o comprometimento da capacidade de produção e conservação da água e solo em propriedades rurais, além da diminuição do armazenamento dos grandes reservatórios, impactando a produção de energia e resultando em uma degradação maior das bacias hidrográficas.

3.1.1. Balanço Hídrico

De acordo com Righetto (1998) pode-se definir balanço hídrico como a quantificação dos fluxos de massa de água em uma bacia hidrográfica em função dos processos hidrológicos que ocorrem no ciclo hidrológico. O balanço hídrico pode ser expresso, simplificado, como:

$$\Delta V = Q_e - Q_s \quad (1)$$

Onde:

ΔV é a variação de armazenamento hídrico, Q_e é a afluência hídrica e Q_s a efluência hídrica. Considerando a dinâmica descrita pelo ciclo hidrológico, tal como os processos que ocorrem em sua extensão, a Equação (1) pode ser reescrita como:

$$\Delta V = P - (E + T + G + Q) \quad (2)$$

Onde:

ΔV é a variação de armazenamento hídrico, P é a precipitação, E a evaporação, T a evapotranspiração, G é o fluxo subterrâneo da bacia e Q o escoamento superficial.

A Figura 3.1.3 ilustra, genericamente, a representação das variações que compõe o balanço hídrico, demonstrando como as variáveis entram ou saem de um sistema hídrico.

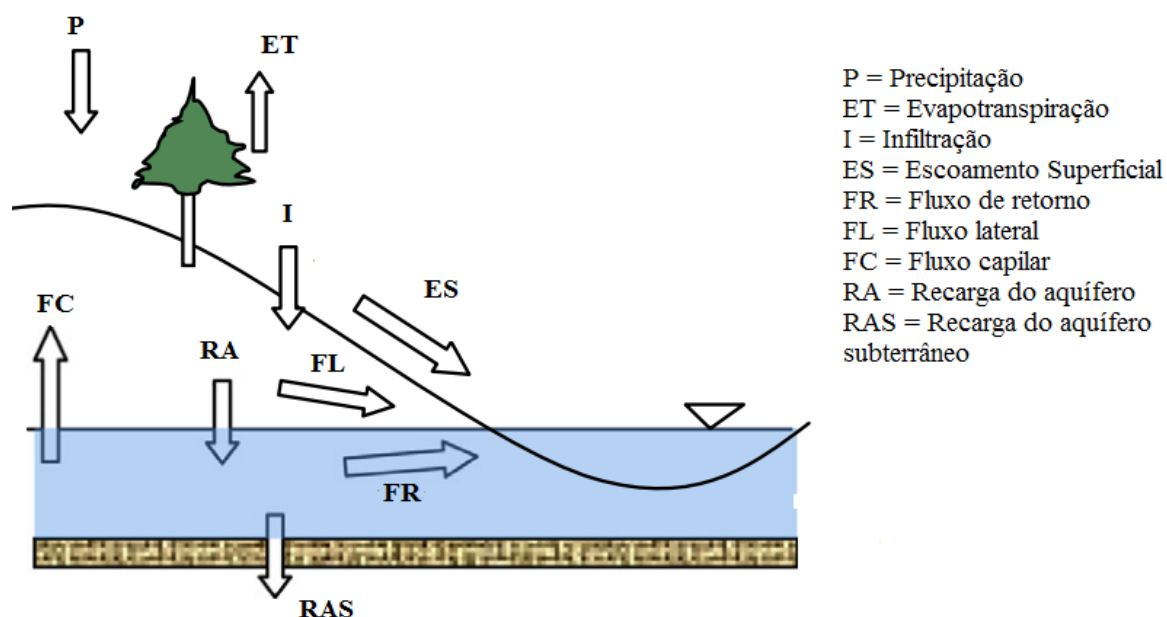


Figura 3.1.3 Esquematização genérica do balanço hídrico. Fonte: Adaptado, Abbaspour et al. (2015)

Silva *et al* (2017) afirmam que determinar o balanço hídrico permite com que se faça um diagnóstico atual, além de simulações futuras, quanto à disponibilidade hídrica de uma região, servindo como uma ferramenta importante para a gestão ambiental. Os autores salientam ainda que, apesar de ter-se ciência e conhecimento dos processos biofísicos e físicos que regem o balanço hídrico, o desenvolvimento de modelos em escala regional torna-se mais difícil pela complexidade de soluções matemáticas. Todavia, balanços hídricos em escalas maiores – a exemplo de bacias hidrográficas – tendem a ser mais simples de modo que os parâmetros possam ser estimados a partir do conhecimento das variáveis físicas e climáticas da região.

3.1.2 Efeitos do uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas

Bonnet *et al* (2008) afirma que os impactos ambientais negativos provenientes do uso e ocupação do solo, em termos hidrológicos, afetam o balanço hídrico, de maneira mais agressiva quanto aos processos de infiltração, escoamento superficial e sobre a carga sedimentológica transportada. Além disso, os autores correlacionam que diversos impactos negativos sobre a qualidade da água dos cursos d'água decorrem de alterações de uso e ocupação do solo.

Brown *et al* (2005) estabelece que a avaliação dos efeitos do uso e ocupação do solo, tal como suas alterações, podem ser avaliadas através da modelagem hidrológica com o intuito de verificação dos valores de vazão da bacia hidrográfica.

Perazzoli *et al* (2013) avaliaram cenários variados de uso e ocupação do solo frente ao regime hídrico e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do ribeirão Concórdia (SC) através da aplicação do modelo SWAT. Em seu estudo, os autores trabalharam com três cenários, sendo um destinado a agricultura, outro com a bacia com mata nativa e um terceiro com pastagem perene compondo a totalidade da bacia hidrográfica. Como resultados, o autor concluiu que entre os três cenários, os valores de vazão obtidos não apresentaram grandes variações entre si, de modo que, o balanço hídrico para o cenário de mata nativa apresentou um maior valor de infiltração, reduzindo o escoamento superficial e sendo justificado por uma melhor estruturação do solo. Os valores mais elevados de vazão obtidos decorreram do cenário de agricultura, onde o solo apresentou grande desgaste e pouca cobertura vegetal. De acordo com os autores, a atividade agrícola corrobora para o escoamento superficial elevado em função da alteração da proteção do solo, estabelecendo que áreas de agricultura apresentam uma maior fragilidade ambiental em termos hídricos.

Santos *et al* (2010) avaliaram a relação entre o uso do solo e o comportamento hidrológico na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite (GO). Os autores obtiveram valores de vazão que se comportaram de maneira similar a Perazzoli *et al* (2013), sendo caracterizados por valores elevados em cenários de maior urbanização da bacia hidrográfica e valores menores em cenários de maior preservação da bacia hidrográfica.

3.2. HIDROGEOMORFOLOGIA

De acordo com Tucci (1993) a geomorfologia pode ser compreendida como a ciência de estudo das formas de relevo, representando espacialmente uma superfície através da integração de suas configurações morfológicas com a água. Christofolletti (1981) aponta que a formação do relevo e de suas implicações, tal como variações topográficas, são formados pela dinâmica do sistema hídrico, apresentando origem no ciclo hidrológico, de modo que sedimentos são desagregados pela ação da água, sendo removidos e transportados até os canais, podendo ser carregados ou depositados.

A concepção do termo hidrogeologia teve suas discussões iniciais na década de 1960, com as publicações de Hack e Goodlett (1961), Tsukamoto (1961), Shreve (1969) e outros. Goerl (2012) destaca que as utilizações do termo, tal como sua conceituação, foram registrados pela primeira vez em uma publicação de um artigo científico no *Journal of Hydrology* por Scheidegger (1973). De acordo com Scheidegger (1973) a hidrogeomorfologia corresponde aos estudos das formas do solo assumidas em função da ação da água.

Através das análises entre as diversas conceituações propostas para a hidrogeomorfologia Goerl et al. (2012) propuseram três modelos que correlacionam a hidrologia e a geomorfologia, que podem ser verificados pela Figura 3.2.1.

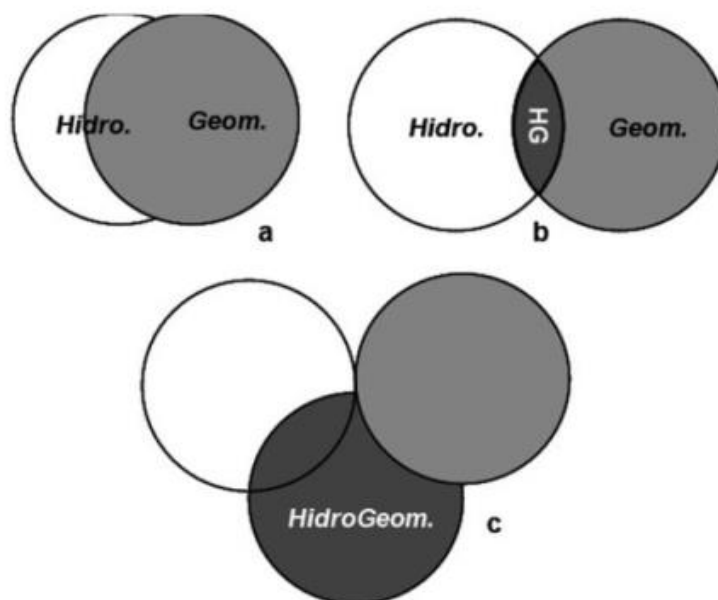


Figura 3.2.1 Modelos conceituais de três interações entre a Geomorfologia, Hidrologia e a Hidrogeomorfologia: a) sobreposição, b) intersecção e c) nova ciência. Fonte: Goerl, 2012.

Assim, os modelos de sobreposição e intersecção demonstram a transição da hidrogeomorfologia para uma nova ciência que apresenta maior independência frente a hidrologia e geomorfologia, embora utilize parte de suas conceituações para compor seu arca bolso.

3.2.1. Parâmetros morfométricos para análise de bacias hidrográficas

Segundo Christofolletti (1999) a análise morfométrica de bacias é a análise quantitativa de configurações dos elementos do modelado superficial que geram sua expressão e configuração espacial. A análise morfométrica de bacias teve seus inícios com Horton (1945), que tinha o intuito de entender a configuração e evolução das bacias e suas respectivas redes de drenagem.

Cherem (2008) afirma que análises morfométricas compreendem o estudo quantitativo de objetos e as associações de seus elementos em sistemas ambientais, onde, os objetos são as bacias hidrográficas – em suas diversas escalas – e os elementos são as superfícies vertentes e redes de drenagem. O autor destaca que o resultado da análise da bacia e de seus elementos permite obter parâmetros morfométricos, sendo eles: a área da bacia, perímetro da bacia, comprimento dos canais fluviais, comprimento vetorial dos canais fluviais, número de canais

fluviais, declividades (mínima, média e máxima) da bacia, declividade dos canais e altimetria.

Christofolletti (1980) classifica os parâmetros morfométricos em três classes: lineares, zonais e hipsométricos. A primeira classe diz respeito a parâmetros responsáveis pela quantificação da rede de drenagem através de seus atributos – a exemplo do comprimento, número, hierarquia e outros – e da relação entre eles. A segunda classe diz respeito a parâmetros que relacionam a rede de drenagem e seu arranjo espacial na bacia, sendo representados, na maioria das vezes, em relação a área da bacia. Por fim, a terceira classe representa a tridimensionalidade da bacia por incluir variações altimétricas. A distribuição dos parâmetros classificados conforme as classes propostas por Christofolletti (1980) fora explicitada através da Tabela 3.2.1.

Tabela 3.2.1 Distribuição dos parâmetros morfométricos conforme as classes propostas por Christofolletti (1980)

Classe	Parâmetros
Linear	Hierarquia fluvial (Hf)
	Magnitude Fluvial (Mf)
	Relação de bifurcação (Rb)
	Relação dos comprimentos médios (RL_m)
	Relação do gradiente dos canais (R_{gc})
Zonal	Índice de sinuosidade (Is)
	Índice de circularidade (Ic)
	Densidade de rios (Dr)
	Densidade hidrográfica (Dh)
	Densidade de drenagem (Dd)
	Relação entre as áreas da bacia (R_A)
Hipsométrica	Coefficiente de manutenção (Cm)
	Curva hipsométrica (Ch)
	Integral Hipsométrica (Ih)
	Amplitude altimétrica máxima (Hm)
	Índice de rugosidade (Ir)
	Declividade média (Dm)

Os parâmetros morfométricos supracitados pela Tabela 3.2.1 serão conceituados e formulados matematicamente a seguir.

Hierarquia Fluvial (Hf): Estabelece a classificação hierárquica de um curso d'água frente ao conjunto total da bacia hidrográfica. A hierarquização pode ser realizada de duas maneiras

diferentes. A primeira, diz respeito ao que fora proposto por Strahler (1952), atribuindo a canais menores, e que não possuam tributários, ordem 1. Canais de segunda ordem nascem da confluência de canais de primeira ordem e assim sucessivamente para as demais ordens. A segunda maneira de hierarquização fora proposta por Horton (1945), onde canais de primeira ordem também não apresentam tributários, todavia, para a classificação de primeira ordem não se deve considerar todos os tributários como de primeira ordem, dado que canais que apresentam maior hierarquia estendem-se até o tributário de maior comprimento. As duas formas de hierarquização estão ilustradas pela Figura 3.2.2.

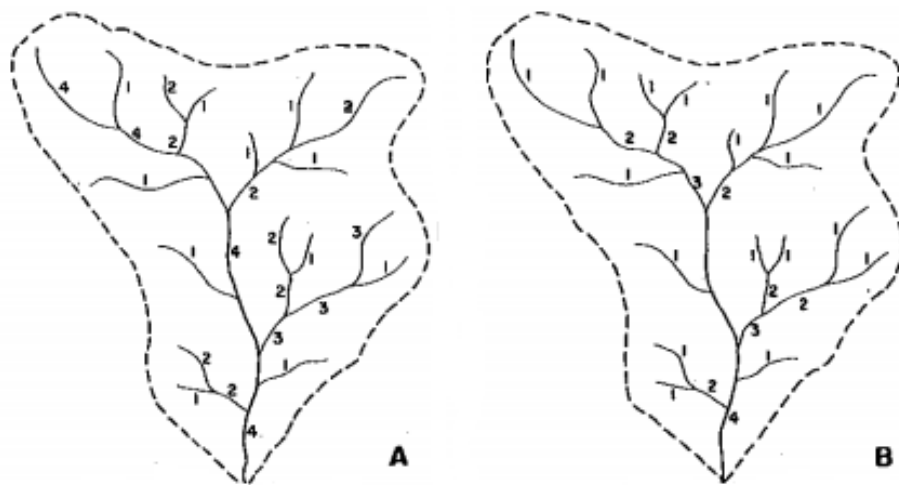


Figura 3.2.2 - Hierarquia fluvial proposta por Horton (1945) (A) e Strahler (1952) (B).
Fonte: Christofolletti (1980).

Magnitude Fluvial (Mf): Determina a medida de ordenação fluvial. Tal como a hierarquia fluvial, a magnitude fluvial adota que canais tributários possuam apresentem a mesma ordem, que de acordo com Shreve (1966) deve apresentar valor 1 e para Scheidegger (1965) deve apresentar valor 2. A cada confluência deve-se somar os valores atribuídos aos canais. A Figura 3.2.3 ilustra, para uma bacia hidrográfica genérica, a magnitude fluvial.

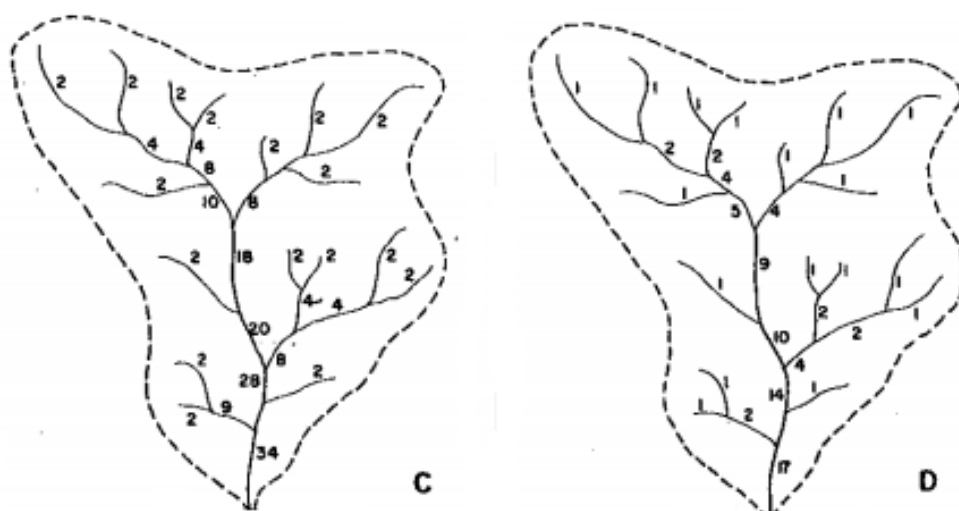


Figura 3.2.3 Magnitude Fluvial definida por Scheidegger (1965) (C) e Shreve (1966) (D).
Fonte: Christofolletti (1980).

Relação de bifurcação (R_B): De acordo com Horton (1945) indica a relação entre a quantidade total de canais de uma determinada ordem e a quantidade total de canais da ordem imediatamente superior. Matematicamente:

$$R_B = \frac{N(x)}{N(x+1)} \quad (3)$$

Onde: $N(x)$ corresponde ao número de canais de uma determinada ordem “x” e $N(x+1)$ corresponde ao número de canais de ordem imediatamente superior a “x”.

Relação entre o comprimento médio dos canais de cada ordem (RL_m): De acordo com Horton (1945) esse índice representa a série geométrica de ordenação dos canais de uma bacia hidrográfica. Matematicamente:

$$RL_m = \frac{Lm_x}{Lm_{x-1}} \quad (4)$$

Onde: Lm_x é o comprimento médio dos canais de ordem “x” e Lm_{x-1} é o comprimento médio dos canais de ordem imediatamente inferior a “x”.

Relação entre os gradientes dos canais (R_{gc}): Parâmetro que representa matematicamente e terceira lei de Horton. De acordo com Horton (1945) para uma bacia há uma relação geométrica inversa entre a declividade média dos canais de uma certa ordem e os canais de ordem imediatamente superior. Matematicamente:

$$R_{gc} = \frac{G_{cx}}{G_{cx+1}} \quad (5)$$

Onde: G_{cx} é a declividade média dos canais de uma determinada ordem “cx” e G_{cx+1} é a declividade média dos canais de ordem imediatamente superior a “cx”.

Índice de sinuosidade do canal principal (I_s): Lana *et al.* (2001) definem o índice como um parâmetro que permite correlacionar como a carga de sedimentos de uma bacia hidrográfica será transportada em função do comprimento vetorial dos extremos do canal principal. Matematicamente:

$$I_s = \frac{L}{dv} \quad (6)$$

Onde: L é o comprimento do canal principal e dv é a distância vetorial entre os pontos extremos do canal principal.

Castro e Alves (2003) propõe que o índice de sinuosidade permite realizar inferências quanto à influência da carga sedimentar, variações de litologia e da geologia estrutural da bacia hidrográfica.

Valores próximos a 1 indicam que a bacia hidrográfica apresenta alta energia, todavia, valores próximos a 2 indicam que a bacia apresenta baixa energia, de modo que valores entre 1 e 2 indicam uma transição entre a sinuosidade do canal entre retilíneo e meandrante.

Índice de circularidade (I_c): Christofletti (1980) estabelece que é um parâmetro morfométrico proposto por Miller em 1953, que representa a relação entre a área total da bacia e a área de um círculo de perímetro igual ao da área total da bacia. O índice apresenta valor unitário como valor máximo. Alves e Castro (2003) propõe que as análises do valor do índice devem ser consideradas tomando como referência o valor de 0,51, onde, para valores abaixo da referência, tem-se uma bacia mais alongada. Para valores acima de 0,51 a bacia apresenta forma mais circular e com escoamento reduzido. Matematicamente:

$$I_c = \frac{A}{A_c} \quad (7)$$

Onde: A é a área da bacia hidrográfica e A_c é a área do círculo de perímetro igual ao da bacia considerada.

Densidade de rios (Dr): De acordo com Christofolletti (1980) é o parâmetro morfométrico que quantifica os canais em relação a área da bacia hidrográfica. De acordo com Horton (1945) o parâmetro é expresso matematicamente como:

$$Dr = \frac{N}{A} \quad (8)$$

Onde: N é o número total de canais e A é a área da bacia hidrográfica.

Densidade de drenagem (Dd): Segundo Christofolletti (1980), é o parâmetro morfométrico que tem por função correlacionar o comprimento total dos canais de escoamento da bacia hidrográfica com a área total da bacia hidrográfica. De acordo com Horton (1945) o parâmetro pode ser calculado a partir da seguinte equação:

$$Dd = \frac{L_t}{A} \quad (9)$$

Onde: L_t é o comprimento total dos canais e A é a área da bacia hidrográfica.

Relação entre as áreas das bacias (R_A): De acordo com Christofolletti (1980), é o parâmetro morfométrico que correlaciona a área dos canais de uma bacia de determinada ordem com a área dos canais de ordem imediatamente inferior. Sua formulação matemática fora desenvolvida por Schumm (1956), sendo dada por:

$$R_A = \frac{A_x}{A_{x-1}} \quad (10)$$

Onde: A_x corresponde a área média dos canais da bacia de uma determinada ordem e A_{x-1} corresponde a área média dos canais das bacias de ordem imediatamente inferior.

Coeficiente de manutenção (C_m): De acordo com Schumm (1956) é o parâmetro morfométrico que expõe o mínimo de área necessária para manutenção de um metro de canal de escoamento, sendo, pelo autor, o parâmetro morfométrico de maior importância para a caracterização morfométrica de bacias hidrográficas. Matematicamente é dado por:

$$C_m = \left(\frac{1}{Dd} \right) \cdot 1000 \quad (11)$$

Onde: Dd é o valor da densidade de drenagem.

Curva Hipsométrica (Ch) e integral hipsométrica (Ih): De acordo com Strahler (1952) é o parâmetro morfométrico que expressa o volume de rocha situado abaixo da superfície topográfica. O parâmetro é calculado a partir do cálculo de áreas entre cada faixa altimétrica da bacia hidrográfica, de modo a gerar um gráfico, no qual as ordenadas correspondem as altitudes e as abscissas correspondam a área. A área do gráfico da curva hipsométrica é denominada de integral hipsométrica. A Figura 3.2.4 apresenta a curva hipsométrica e a integral hipsométrica para uma bacia hidrográfica genérica.

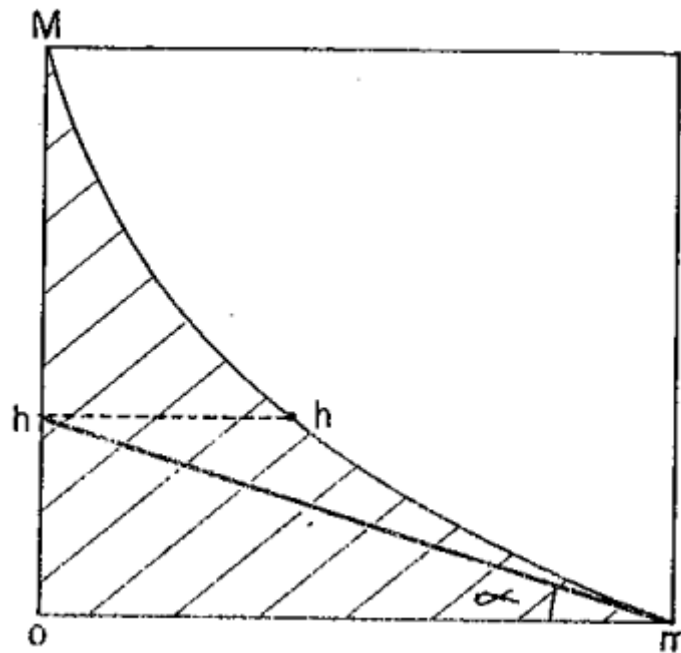


Figura 3.2.4 Curva hipsométrica (Mm), integral hipsométrica (superfície Mom) e altura média (oh). Fonte: Christofolletti (1980).

Amplitude altimétrica média (Hm): De acordo Schumm (1956) corresponde à diferença entre o ponto de maior altitude e o ponto de menor altitude da bacia hidrográfica, sendo denominado de “relevo máximo da bacia”.

Índice de rugosidade (Ir): Definido por Melton (1957) como uma representação adimensional. Strahler (1958) afirma que o índice correlaciona as qualidades da declividade e o comprimento das vertentes com a densidade de drenagem. É expresso matematicamente por:

$$Ir = H \cdot Dd \quad (12)$$

Onde: H é a amplitude altimétrica e Dd é a densidade de drenagem.

Cherem (2008) estabelece que elevados índices de rugosidade associam-se com um potencial de ocorrência de cheias na bacia hidrográfica, em função de apresentarem elevada energia (em função de valores elevados de amplitude altimétrica), ou podem expressar bacias com elevada transmissividade hidráulica, visto que os pontos da bacia estão próximos à rede de drenagem, o que implica na conversão do fluxo vertente para fluxo fluvial em tempo reduzido.

Declividade média (Dm): Expressa, segundo Cherem (2008), a intensidade de processos morfogenéticos frente a dinâmica de escoamento da bacia.

3.3 PLANEJAMENTO E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

A partir da diversificação e complexidade da economia, novas formas de uso foram atribuídas aos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Com uma maior diversificação econômica, caminha-se para uma maior dependência dos recursos hídricos, principalmente em regiões que apresentam grandes variações anuais no ciclo hidrológico. Tundisi (2003) destaca que os recursos hídricos apresentam grandes conflitos de interesse em função de duas principais causas: o crescimento populacional aliado à urbanização e a irrigação.

Righetto (1998) traz como exemplos de conflitos o despejo de cargas orgânicas em corpos d'água, que influencia o abastecimento humano; ajustes da variação temporal da oferta natural de água à demanda solicitada, fato que torna necessário a criação de reservatórios e, por conseguinte, dos impactos ambientais negativos relativos à construção, instalação e operação; captações de água que fazem com que parte do que foi utilizado não retorne ao corpo d'água de origem.

Considerando um cenário de abundância de água, tem-se que ela pode ser tratada como um bem livre, não apresentando valor econômico. Todavia, considerando um cenário de crescente demanda, surgem conflitos quanto aos usos da água, de modo que começa a ser gerida apresentando valor econômico, onde o valor associado é proporcional a demanda solicitada e tipo de uso. Setti *et al* (2001) destacam que a falta de água pode ocorrer em função de aspectos qualitativos, sendo resultado da poluição que faz com que a água não se enquadre nos limites solicitados pela legislação corrente conforme o uso atribuído.

Diante do contexto supracitado, Righetto (1998) afirma que para a resolução de conflitos de interesse e escassez hídrica em uma determinada tornam-se necessários estudos, planejamento e ações, que são componentes primordiais para a gestão de recursos hídricos. A Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, estabelece em seus Artigos 7 (Inciso III),

32 (Inciso II), 35 (Inciso II) e 38 (Inciso II), as competências para a mediação e solução de conflitos de interesse relativo ao uso de recursos hídricos.

3.3.1 Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Brasil

Historicamente, a gestão de recursos hídricos no Brasil teve seus primeiros passos na década de 1930, com o Decreto nº 24.643, de 10 julho de 1934, que criou o Código de Águas, estabelecendo usos da água, formas de distribuição, integração com o setor energético e formas de fiscalização. Embora tenha sido um dos primeiros passos tomado pelo país, lacunas não foram preenchidas, a exemplo de contaminação das águas, usos estabelecidos ao longo do Decreto que conflitavam entre si, além de não promover a gestão de forma descentralizada e participativa. De acordo com Tucci *et al*(2001) um dos principais conflitos que permeava o Código de Águas estava na derivação de águas públicas para aplicação na agricultura, embora houvesse regulação administrativa permitindo todos e quaisquer usos de águas públicas.

A gestão dos recursos hídricos no Brasil, até a década de 80, ocorria de forma setorial. Tucci e Mendes (2006) destacam que neste período a legislação era marcada por alguns desatinos, tais como a extrema influência e domínio do setor energético, o meio ambiente com diversos projetos e impactos ambientais negativos, elevado consumo de água e o embate com processos de irrigação e ordenamento da agricultura e outros. Os autores destacam ainda que, a nível estadual, o setor de água e saneamento absteve-se das discussões na esfera federal.

Outro marco fundamental para a gestão de recursos hídricos fora a promulgação da Constituição Federal de 1988. De acordo com o Artigo 20, inciso III, a água (seja ela subterrânea ou não) passa a ser um bem da União. Com isso, passa a não possuir um caráter particular, independentemente de onde ela seja originária, fazendo com que sua utilização seja subordinada ao interesse público.

O modelo atual utilizado, que fora instituído pela Lei Federal 9.433/1997, estabelece a gestão integrada considerando os usos múltiplos da água, tomando como base a bacia hidrográfica. Propõe-se, assim, um modelo descentralizado e participativo, que se baseia na criação de Comitês de Bacias Hidrográficas que são compostos por representantes do governo, nas esferas municipal, estadual e federal, usuários da água e entidades não governamentais que compõe a sociedade civil. Segundo Malheiros *et al* (2013), a participação popular no sistema de gestão de recursos hídricos torna-se importante em função da água ser utilizada com

diversos interesses, de modo que negociações e decisões coletivas possam contribuir para uma melhora da gestão.

A PNRH, conforme disposto em seu Artigo 1º pauta-se em seis fundamentos, sendo eles: a água é um bem de domínio público; a água é um recurso natural limitado e que apresenta valor econômico; o uso prioritário da água é para o consumo humano; uso múltiplo dos recursos hídricos; a bacia hidrográfica é uma unidade operacional e de planejamento e a gestão descentralizada. Além disso, o Artigo 5º explicita os instrumentos que são adotados para a gestão de recursos hídricos: plano de recursos hídricos; enquadramento de corpos d'água em classes conforme o uso; cobrança pelo uso da água; outorga de direito de uso dos recursos hídricos; e a construção do Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

Tucci e Mendes (2006) salientam que apesar das principais lacunas que foram preenchidas pela PNRH, a mesma ainda apresenta desafios quanto a sua efetivação. Os desafios incluem a disponibilidade de recursos orçamentários e a garantia de uma aplicação correta; a aplicação da gestão integrada entre os diversos setores energéticos; extensão do processo de descentralização; melhoria dos sistemas de informações hidrológicas; e a manutenção os investimentos em ciência e tecnologia.

3.3.2 Gestão da Qualidade da Água no contexto de uso e ocupação do solo

Tundisi (2006) afirma que a água é um recurso de elevada vulnerabilidade em função de seus usos múltiplos, tornando-se necessária sua gestão de maneira adequada. Todavia, Tucci (2003) afirma que para gerir a água de maneira correta, tem-se um caminho que, em muitas vezes, necessita de soluções específicas em virtude dos diversos conflitos de uso múltiplo a ela associadas, a exemplo dos empreendimentos agrícolas que necessitam de elevadas quantidades de água para sistemas de irrigação ao passo que em outras porções do país lida-se com a escassez hídrica diariamente.

Pereira (1997) estabelece que a qualidade da água é influenciada por diversas características da bacia hidrográfica, destacando: clima, declividade, geologia, geomorfologia, e, principalmente, o tipo de uso e ocupação do solo associado. De acordo com Arcova *et al* (1998), a qualidade da água de uma bacia hidrográfica pertence a um sistema de alta fragilidade, de modo que alterações físicas, químicas ou bióticas na bacia hidrográfica impactam fortemente sobre a qualidade da água.

Nesse contexto, Oliveira *et al* (2016) propõe que municípios que apresentem grandes esforços para gestão ambiental com enfoque para qualidade da água frente ao uso e ocupação do solo, tendem a minimizar impactos ambientais negativos.

O termo “qualidade da água” fora instituído pela resolução CONAMA n° 20/1986, que diz respeito a classificação de águas doces, salinas e salobras a partir de seus usos múltiplos. Os corpos d’água, então, são classificados em nove classes, onde: cinco classes destinam-se para águas doces, duas classes para águas salinas e duas classes para água salobra. Destaca-se que, de acordo com a resolução supracitada, há a existência de uma classe dita como especial, que é apta para usos domésticos sem qualquer tipo tratamento prévio.

A classificação das águas é uma medida de suma importância no que diz respeito ao gerenciamento de qualidade da água, de modo que a partir da classe e uso da água, propõem-se medidas que visem a gestão ambiental adequada do corpo hídrico.

Silva & Porto (2003) realizaram uma avaliação da gestão de qualidade da água para bacias urbanas, onde, concluíram que, os usos e ocupação do solo, à medida que refletem diretamente sobre a qualidade da água da bacia hidrográfica, também evidenciam a necessidade de que medidas de planejamento e ordenamento territorial sejam tomadas com a finalidade da diminuição de problemas ambientais, tais como inundações e afins. Além disso, os autores destacam que a gestão de qualidade está junto à gestão de demandas solicitadas pela bacia hidrográfica.

3.4 MODELOS HIDROLÓGICOS

Um modelo pode ser definido como uma representação simplificada da realidade com o intuito de compreender melhor as características que compõe e afetam qualquer sistema.

Segundo Rennó & Soares (2000) a utilização de modelos relativos ao meio ambiente tem crescido bastante, visto que tem se tornado uma alternativa para a compreensão de impactos ambientais negativos, tais como a mudança nos usos da terra e prever alterações futuras em ecossistemas. De maneira geral, pode-se resumir um modelo a um sistema de equações distribuídas e associada a vários parâmetros.

Os autores supracitados destacam, ainda, que a utilização de modelos se torna uma opção para obter conhecimentos frente aos processos do meio ambiente em virtude de sua grande complexidade e por não apresentarem um comportamento homogêneo e distribuído, sendo tipicamente tridimensionais e temporais. Além disso, as complexidades relativas aos processos podem incluir comportamentos não-lineares e multiescalares.

Embora os sistemas computacionais sejam os maiores alicerces da modelagem, eles podem representar uma grande limitação frente à modelagem. Além disso, Rennó & Soares (2000) destacam que diversos modelos apresentam dificuldade quanto aos processos que os compõem em função da dificuldade de parametrizar as formulações dos processos físicos, que, implicam em uma maior capacidade computacional para que o modelo seja eficiente.

3.4.1 Evolução dos Modelos Hidrológicos

De acordo com Sing e Woolhiser (2002), até meados da década de 1960, os primeiros modelos hidrológicos produzidos focavam-se em realizar uma análise individual das variáveis que compõem o ciclo hidrológico. Os dois autores destacam que o início dos modelos de análise das componentes do ciclo hidrológico fora iniciado no ano de 1850, com o desenvolvimento do método racional proposto por Mulvany. Em 1911 Green e Ampt desenvolveram as primeiras concepções para a teoria do processo de infiltração; Horton (1919) utilizou-se da derivação de fórmulas empíricas para estimar a interceptação de tempestades por tipos variados de cobertura vegetal; Puls (1928) realizou estudos do escoamento em reservatórios; Richardson (1931) e Cummings (1935) publicaram os primeiros trabalhos sobre a evaporação em ambientes lênticos; Sherman (1932) publicou a relação entre o escoamento e o excesso de chuva a partir do conceito de hidrograma unitário; Horton (1933) divulgou a teoria da infiltração frente à estimação de excessos de chuva e aprimorou as técnicas de separação de hidrograma; Fair e Hatch (1933) derivaram a fórmula para compatibilizar a permeabilidade do solo; Theis (1935) obteve a duração da descarga de um poço a partir da combinação da Lei de Darcy e a equação da continuidade; McCarthy (1938) desenvolveu o método de Muskingum para o escoamento em rios; Barnez (1940) desenvolveu técnicas para separação do escoamento de base e interfluxo de um hidrograma; Jacob (1943, 1944) estabeleceu correlações entre níveis de água subterrânea e a precipitação; Thornthwaite (1948) e Penna (1948) desenvolveram contribuições com modelos de evapotranspiração; Lightill e Whitham (1955) desenvolveram o modelo de ondas cinemáticas para o fluxo em rios extensos; e o Soil Conservation Service (SCS) (1972) desenvolveu o método do SCS Curve Number para cálculo de escoamento.

Com o início da revolução digital na década de 1960, diversos componentes do ciclo hidrológico, além da simulação de bacias hidrográficas em toda sua extensão, puderam ser integrados. A exemplo, pelo modelo Stanford Watershed Model (SWM), atualmente conhecido como HSPF, desenvolvido por Crawford e Linsley (1966) que foi, provavelmente, o primeiro modelo a modelar o ciclo hidrológico de maneira completa,

utilizando a distribuição espacial do processo de infiltração. Ademais, diversos modelos sem distribuídos foram desenvolvidos com o intuito de expender a variabilidade espacial dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas, além de modelo para simular despejos de cargas orgânicas a partir de fontes pontuais e difusas de poluição.

3.4.2 Classificação dos Modelos Hidrológicos

Rennó & Soares (2000) propõem uma descrição geral que rege os modelos, onde as variáveis que os compõe classificam-se em três tipos: de estado, processo e forçante. A primeira diz respeito a variável de interesse do modelo, a segunda diz respeito as entradas e saídas da variável de estado e, por fim, a terceira, que correspondem a variáveis utilizadas pelo modelo, mas que não são calculadas por ele e que apresentam sua variação explicitada. A Figura 3.4.1 esquematiza um modelo hipotético. Nele, há duas variáveis de estado (representadas por E_1 e E_2) e quatro processos (representados por P_1 , P_2 , P_3 e P_4) e três variáveis forçantes (representadas por F_1 , F_2 e F_3). Assim, através da análise da Figura 3.4.1 percebe-se que as variáveis de estado recebem fluxos, através das variáveis de processo, que impulsionam o modelo, e parte do fluxo retorna e a outra é dirigida em sequência. Com isso, diversas relações das componentes do modelo podem ser obtidas.

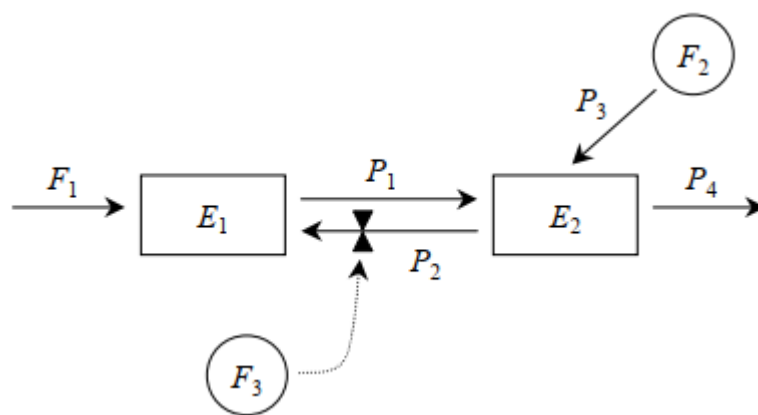


Figura 3.4.1 Descrição de um modelo genérico. Fonte: Rennó & Soares (2000)

Ferrigo (2014) estabelece que os sistemas hídricos apresentam grande complexidade, de modo que a utilização de modelos hidrológicos permite compreender e integrar os fenômenos que compõe o ciclo hidrológico e sua influência para diversas condições observadas, tendendo a facilitar a os estudos de um sistema hídrico e de suas variáveis.

Tucci (1998) salienta que a modelagem hidrológica é afetada pela heterogeneidade da bacia hidrográfica e os processos que a permeiam, de modo que em função disso, diversos modelos com dados, funções, discretizações, temporalidade, escala e objetivos foram criados.

Em função da diversidade de funções e objetivos dos modelos hidrológicos, Viessman Jr. e Lewis (2002) propuseram a categorização dos modelos hidrológicos em seis categorias descritivas. A Tabela 3.4.1 apresenta o sistema de classificações de modelos hidrológicos.

Tabela 3.4.1 Classificação dos modelos hidrológicos. Fonte: Lewis (2002).

Categoria	Descrição	Exemplo
Físicos	Representam sistemas a partir do princípio da similaridade	Escoamento natural simulado em laboratório
Matemáticos	Representam sistemas a partir de formulações matemáticas	Teoria do hidrograma unitário
Empíricos	Representam sistemas reais a partir de uma formulação matemática baseada em dados experimentais	Cálculo da vazão de uma seção de geometria qualquer a partir de um ponto a montante
Conceituais	Baseados em concepções teóricas	Cálculo da variação de nível de um lençol freático
Concentrados	Desconsideram variações espaciais dos parâmetros que o compõe.	Obtenção da distribuição temporal do escoamento superficial a partir do hidrograma unitário
Distribuídos	Consideram variações espaciais dos parâmetros que o compõe.	Simulação em águas subterrâneas considerando variações no armazenamento e transmissividade.
Estocásticos	Descrevem sistemas regidos exclusivamente por funções de probabilidade.	Determinar a operação ótima de sistemas de reservatórios.
Determinísticos	Descrevem sistemas onde as variáveis são regidas pelas equações do modelo	Simular a concentração de parâmetros de qualidade da água para redes de distribuição
Eventos	Descrevem sistemas que são simulados em curta duração (horas ou minutos)	Determinação da distribuição da precipitação em áreas isoladas
Contínuos	Descrevem e sistemas que são modelos considerando intervalos anuais	Simulação da distribuição decadencial de chuvas
Water Budget	Descrevem e simulam condições a partir da verificação de uma série histórica de dados	Simulação da distribuição espacial de precipitação sobre uma bacia de drenagem
Preditivos	Descrevem e simulam condições futuras a partir de informações sintéticas	Simulação de eventos extremos

Todini (1988) afirma que o surgimento das primeiras concepções de modelos hidrológicos pode ser atribuído ao surgimento da engenharia civil na primeira metade do século XIX, onde, inicialmente, sua concepção era atribuída como uma ferramenta de desenvolvimento tocante a diversas áreas como saneamento, hidráulica, planejamento urbano, estruturas e outras.

3.3.1.1 Modelos Hidrológicos Distribuídos

De acordo com Santos (2002) o grau de representação de um modelo em função de sua temporalidade e espacialidade é um dos parâmetros de maior importância, onde, características quanto a temporalidade e espacialidade são típicas de modelos concentrados ou distribuídos. O primeiro, diz respeito a modelos cujos parâmetros e variáveis são função exclusiva do tempo, todavia, o segundo diz respeito a modelos onde as variáveis e parâmetros que os compõe apresentam variação espacial e temporal.

Lima (2011) propõe que modelos hidrológicos distribuídos apresentam grande eficiência para estudos de heterogeneidades espaciais relativas aos fenômenos em uma bacia hidrográfica. Assim, um modelo distribuído integrado com sistemas de informações geográficas, torna possível a representação com maior exatidão das transformações espaciais e hidrológicas de sistemas hídricos, sendo, essa, a principal justificativa para adoção de modelos hidrológicos distribuídos para estudos, a nível de bacia hidrográfica, de uso e cobertura do solo e regime hidrológico.

Rennó & Soares (2000) apontam que, em modelos hidrológicos distribuídos, comumente é feita a discretização do espaço, com isso, geram-se diversos pontos que representam homogeneamente a área de estudo, e, quando os pontos se relacionam com seus vizinhos espacialmente, tem-se um modelo distribuído mais realista.

Segundo Gama (2011) modelos hidrológicos distribuídos apresentam grande importância em virtude de permitirem a geração de dados em bacias hidrográficas, podendo, ainda, gerar estimativas de vazões em áreas que não apresentam monitoramento hidrológico ou que apresentem pouca disponibilidade de informações hidrológicas e climáticas. O autor salienta que na vertente da modelagem hidrológica, a falta de monitoramento hidrológico e, por conseguinte, ausência ou inconsistência de dados, mostram-se como fatores limitantes. Todavia, a aplicação de modelos hidrológicos distribuídos de chuva-vazão pode ser utilizada para o preenchimento dos lapsos de dados, dado que os modelos distribuídos utilizam variáveis físicas das bacias hidrográficas, permitindo a diferenciação da bacia hidrográfica em unidades e corroborando para uma simulação de maior compreensão da heterogeneidade a ela associada.

Com isso, tem-se diversas aplicações em que os modelos hidrológicos distribuídos podem ser enquadrados. Gama (2011) propõe como aplicações: previsão de vazões em tempo real, previsão de vazões sazonais, estimativa de disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas

não monitoradas e análise de impactos frente à construção e operações de obras hidráulicas sobre o regime hidrológico de bacias hidrográficas.

Dentre os diversos modelos hidrológicos distribuídos e utilizados na atualidade, pode-se destacar o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool). O SWAT é um modelo hidrológico distribuído de domínio público, desenvolvido em 1996 nos Estados Unidos pela Agricultural Research Service (ARS) e pela Texas A&M University. Nunes (2016) afirma que o modelo SWAT é um modelo distribuído utilizado em larga escala para compreender as variações no regime hidrológico e da qualidade da água de bacias hidrográficas a partir de mudanças em suas características, sejam elas de ordem físicas ou químicas.

3.4.3 Integração entre Modelos Hidrológicos e Sistemas de Informações Geográficas (SIG)

Ortiz (1993) destaca que os Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) podem ser expressos como sistemas de manipulação de dados matriciais e vetoriais georreferenciados através da utilização de um sistema computacional capacitado. Câmara Neto (1995) propõe uma estruturação para os SIGs (Figura 3.4.2).

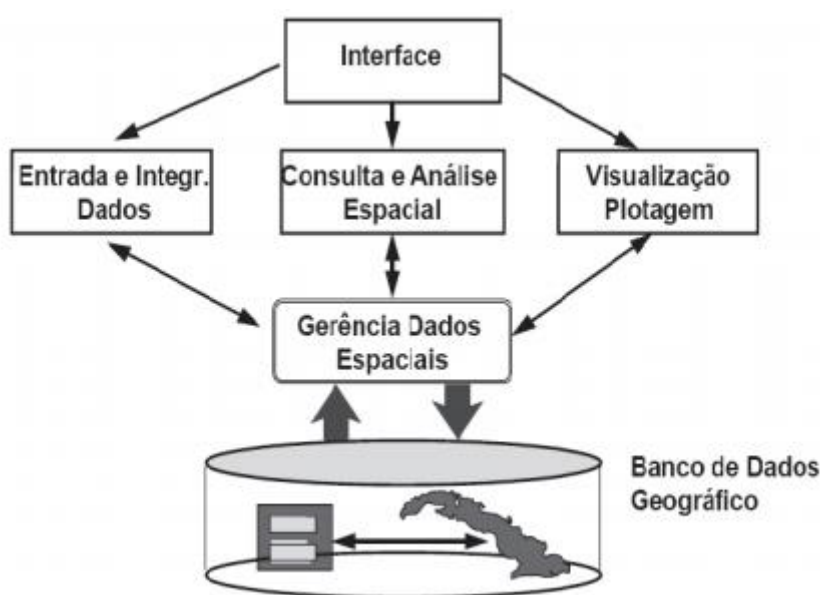


Figura 3.4.2 Estrutura geral de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs). Fonte: Câmara Neto (1995).

Segundo Felizardo (2016) a integração entre modelos hidrológicos e SIGs permite conhecer como ocorre a distribuição espacial de impactos ambientais negativos em sistemas hídricos, de modo que os modelos hidrológicos possam realizar simulações com a utilização de

cenários e consigam realizar inferências entre o diagnóstico atual e os resultados para cada cenário simulado.

Felizardo (2016) salienta que a integração entre as informações hidrológicas com os SIGs tem sido utilizada amplamente para o conhecimento de bacias urbanas que carecem de dados, a partir de um plano de informações hidrológicas e físicas que compõe o modelo e que apresentem correlação temática com os SIGs, tais como: geologia, pedologia, hipsometria, uso e cobertura do solo e morfometria.

Tsou e Whittemore (2001) estabelecem que os SIGs corroboram para a tomada de decisão à medida que são plataformas que permitem ao usuário realizar integrações, tabular e compilar dados que, em função desse tratamento, aumentam a precisão da calibração e validação do modelo hidrológico. Além disso, os autores propõem uma classificação para a integração dos SIG's com os modelos hidrológicos: integração através de uma interface de transferência de dados ou a integração através de equações. A primeira classificação diz respeito ao tratamento dos arquivos de entrada do modelo hidrológico através dos SIG's, onde são feitas correções e adequação dos dados. A segunda classificação refere-se à integração realizada entre o equacionamento que compõe o modelo hidrológico juntamente aos componentes dos SIG's, como, por exemplo, complementos e ferramentas.

3.5 MODELO SWAT

De acordo com Neitsch *et al* (2011) o SWAT é um modelo hidrológico concebido em escala de bacia hidrográfica, utilizado para predição de impactos ambientais de práticas de manejo de terra e água, produção e transporte de sedimentos agroquímicos em áreas agrícolas e modelagem de qualidade da água – com foco em nutrientes – em bacias hidrográficas. Dentre seus principais componentes, destacam-se: hidrologia, clima, cobertura e crescimento vegetal, nutrientes, pesticidas, sedimentos e manejo agrícola.

O desenvolvimento do modelo SWAT tem sido aprimorado, desde seu início na década de 90. Sua concepção, advém, originalmente, do modelo SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins). Arnold *et al* (2009) destacam quatro modelos que foram utilizados como base e adaptados para que o SWAT fosse desenvolvido: SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins), CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion From Agricultural Management Systems), GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management System) e EPIC (Environmental Policy Integrated Climate). O primeiro modelo diz respeito a um modelo de análise contínua de dados com passos regulares para simular descargas de fontes de poluição difusas de bacias hidrográficas. O segundo,

trata de um modelo em escala de campo para estimular o impacto da gestão do solo na água, nutrientes, sedimentos e pesticidas que escoam pelo limite do terreno. O terceiro, é um modelo de fontes de poluição difusas com enfoque em descargas de pesticidas e nutrientes em águas subterrâneas. Por fim, o quarto é um modelo para simular o impacto da erosão na produtividade e produção de colheitas e gestão agrícola frente a fontes de poluição difusas.

Moriasi *et al* (2007) propõe que o SWAT pode ser classificado com um modelo determinístico, semiconceitual, contínuo, semidistribuído e dinâmico. Todavia, embora seja conceituado como um modelo semidistribuído – modelos que apresentem algum processo simulado de maneira empírica, o modelo é considerado concentrado frente as discretizações que realiza ao gerar Unidades de Resposta Hidrológica (URH), que são unidades homogêneas que permitem representar a heterogeneidade da bacia hidrográfica.

Arnold *et al* (2009) destaca que o SWAT apresenta uma concepção física incorporada, onde, ao invés de adotar um equacionamento de regressão para correlacionar as variáveis de entrada e saída, ele requer que o usuário apresente diversas informações referentes ao clima, solo, topografia, vegetação e gestão do solo que ocorram na bacia hidrográfica de estudo. Assim, tem-se uma vantagem para monitorar bacias hidrográficas que carecem de acompanhamento e dados (bacias não-monitoradas) e a equiparação entre cada variável de entrada frente à qualidade da água, uso e ocupação do solo e afins. Além disso, os autores destacam ainda que o SWAT é um modelo de tempo contínuo, sendo um modelo de produção de longo prazo, fato que permite modelar com eficiência impactos ambientais de longo prazo, principalmente com enfoque para o solo.

Por representar diversas complexidades inerentes aos sistemas hídricos, o SWAT apresenta atualizações e melhoras incorporadas desde sua primeira versão até a versão atual (versão 2012). Arnold *et al* (2009) catalogaram melhorias incorporadas desde a primeira versão do modelo SWAT (SWAT 94.2) até a versão dos anos 2000. Tabela 3.5.1 apresenta as alterações e melhorias do modelo SWAT, considerando sua versão inicial e as versões posteriores até a versão divulgada nos anos 2000.

Tabela 3.5.1 Alterações e melhorias do modelo a cada versão lançada. Fonte: Arnold *et al* (2009)

SWAT94.2	SWAT96.2	SWAT 98.1	SWAT99.2	SWAT2000
Incorporação de Unidades de Respostas Hidrológicas (URHs)	Adição de autofertilização e auto irrigação às opções de gerenciamento; adição da modelagem de CO ₂ para o modelo de crescimento de colheita e estudos de mudança climática; incorporação da equação potencial de evapotranspiração de Penman-Monteith; cálculo do fluxo lateral de água no solo a partir do modelo de acúmulo cinemático; fluxo de nutrientes e qualidade da água incorporados a partir do equacionamento do QUAL2E e rota do fluxo de pesticidas.	Alterações da rotina de derretimento de neve; aprimoramento da qualidade do fluxo da água; expansão das rotinas do ciclo de nutrientes; adição pastagem, adubos e telhas de drenagem como opções de gerenciamento; modificação do modelo para uso no hemisfério sul.	Alteração da rotina do ciclo de nutrientes; rotinas de arroz e pântanos foram aprimoradas; adição do processo de decantação como forma de remoção de nutrientes em reservatórios, açudes e pântanos; Adição do acúmulo de água nas margens em toda sua extensão; Inclusão da rota dos metais por toda a extensão do rio; Incorporação de equações de crescimento e limpeza urbana do SWMM (Storm Water Management Model); Incorporação do equacionamento de regressão do USGS (United States Geological Survey).	Incorporação de rotinas para transporte de bactérias; Adição da infiltração de Green & Ampt; Aperfeiçoamento do gerador de clima; Permissão de leitura ou geração da radiação solar diária, da umidade relativa e da velocidade do vento; Permissão de leitura ou cálculo de valores potenciais de evapotranspiração para bacias hidrográficas; Revisão dos métodos de evapotranspiração; Melhorias nos processos de evaporação de faixa; Simulação

3.5.1 Aspectos gerais do modelo SWAT

Arnold *et al.* (2012b) propõe uma descrição geral do funcionamento do modelo que será explicitada a seguir.

O modelo SWAT é dito como um modelo hidrológico matemático que realiza simulações em escalas de bacia hidrográfica. Para realizar as simulações, o modelo realiza a discretização da bacia hidrográfica de interesse, ocorrendo a partir da geração de sub-bacias ou de Unidades de Resposta Hidrológicas (URH). Salienta-se que há uma distinção entre sub-bacias e URH's. A primeira corresponde ao primeiro nível de divisão de uma bacia

hidrográfica, enquanto a segunda corresponde a uma área onde ocorre a interação de diversas topologias físicas (altimetria, uso do solo, pedologia e outras) dentro da sub-bacia.

Independente do propósito com a modelagem a ser feita com o SWAT, o balanço hídrico rege o modelo. Para que a simulação ocorra de maneira satisfatória e os diagnósticos possam ser precisos frente ao cálculo das cargas (sedimentos, nutrientes e pesticidas) e variações do uso do solo, a representação do ciclo hidrológico, e, por conseguinte, sua quantificação através do balanço hídrico, devem estar de acordo com a situação real da bacia hidrográfica. Com isso, o modelo propõe a separação do ciclo hidrológico em duas fases: terrestre e aquática. A primeira corresponde a quantificação das massas de água no canal principal de cada sub-bacia, enquanto a segunda corresponde ao fluxo das massas de água do canal principal da bacia até seu exutório.

Por se tratar de um modelo hidrológico que apresenta grande necessidade de uma quantificação correta por meio do balanço hídrico, o clima, tal como os processos associados a ele, representa uma força de impulsão, dado que sua influência nos diferentes componentes do ciclo hidrológico. O modelo apresenta como variáveis climáticas necessárias para simulação: precipitação diária, temperaturas mínimas e máxima, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Particularmente, o modelo permite que os dados climáticos sejam inseridos a partir de registros ou gerados durante a simulação a partir de um gerador de clima, que gera valores diários a partir de valores das médias mensais.

O modelo apresenta um módulo utilizado para simular as interações entre cobertura do solo e vegetações em plantas, diferenciando as plantas em anuais ou perenes. Plantas anuais crescem a partir do momento do plantio até sua colheita, enquanto plantas perenes mantêm seus sistemas de raízes ao longo do ano, tornando-se dormentes nos meses de inverno. Seu crescimento é retomado quando a média diária de temperatura do ar excede o mínimo, ou base, da temperatura necessária. Com isso, o modelo de crescimento da planta é utilizado para avaliar a retirada da água e dos nutrientes das zonas de raízes, transpiração, produção e resultado da biomassa.

O modelo compatibiliza a erosão e produção de sedimentos para cada URH com a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE) proposta por Willians (1975). A MUSLE simula a erosão e produção de sedimentos a partir da quantificação do escoamento, ao passo que a Equação Universal de Perda de Solo (USLE) proposta por Winschmeier e Smith (1940), utiliza um indicador de energia erosiva. Assim, a precisão da simulação que ocorre no modelo é aumentada. O modelo fornece estimativas de volumes e taxas de escoamento,

que para cada sub-bacia, são utilizados para calcular a variável de energia erosiva do escoamento.

Além dos módulos supracitados, o modelo SWAT permite simular o rastreo e movimentação de nutrientes – fósforo e nitrogênio - e suas transformações na bacia hidrográfica. As transformações de nitrogênio são regidas pelo ciclo do nitrogênio. As transformações do fósforo são regidas pelo ciclo do fósforo. Os nutrientes podem ser introduzidos no canal principal da bacia hidrográfica e transportados a jusante através do escoamento superficial e fluxo subterrâneo lateral.

O modelo SWAT, conta, também, com a opção de simular o movimento de pesticidas para dentro de rios através do escoamento superficial, e para dentro do perfil do solo e do aquífero através da percolação. As equações utilizadas para modelar o movimento dos pesticidas foram adotadas do GLEAMS. O movimento dos pesticidas é função de sua solubilidade, degradação da meia-vida e coeficiente de absorção de carbono orgânico do solo. O transporte do pesticida pela água e pelo sedimento é calculado para cada escoamento e a lixiviação do pesticida é calculada para cada camada de solo quando ocorrer a percolação.

Por fim, o modelo SWAT conta com a funcionalidade do gerenciamento. Essa funcionalidade permite que se possa definir as práticas de gerenciamento envolvendo as URHs. Pode-se definir o início e fim das estações de crescimento, atribuir o prazo e quantificar fertilizantes, pesticidas e a irrigação a serem aplicadas, tal como o prazo de operações de lavoura. Com o fim da estação de crescimento, a biomassa produzida pode ser removida da URH em forma de produção ou disposta na superfície como resíduo. Além dessas práticas, que são ditas básicas de gerenciamento, o usuário possui disponível operações como pastagem, fertilização automatizada, aplicações de água e incorporação de cada opção de gerenciamento concebível para a utilização de água. Como opções para utilização de água, o modelo permite que a aplicação em terras agrícolas ou abastecimento para uma cidade. O SWAT permite que a água seja aplicada em uma URH de qualquer fonte, estando dentro ou fora da bacia hidrográfica. Além disso, a água pode ser transferida entre reservatórios, trechos e sub-bacias hidrográficas, assim como pode ser exportada da bacia hidrográfica.

3.5.2 Equacionamento básico do SWAT

O modelo SWAT conta com diversos equacionamentos que permitem executar a simulação dos processos que ocorrem em bacias hidrográficas. O equacionamento completo do modelo

pode ser consultado de acordo com o manual do modelo fornecido por Neistch *et al.* (2011). Todavia, deve-se explicitar a formulação matemática básica que rege o modelo, que abarca o balanço hídrico considerando a fase terrestre do ciclo hidrológico.

$$SW_t = SW_o + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (13)$$

Onde,

SW_t = quantidade final de água no solo (mm H₂O);

SW_o = quantidade inicial de água no solo (mm H₂O);

t = tempo em dias;

R_{day} = quantidade de precipitação no dia “i” (mm H₂O);

Q_{surf} = quantidade de escoamento superficial no dia “i” (mm H₂O);

E_a = quantidade de evapotranspiração no dia “i” (mm H₂O);

W_{seep} = quantidade de água percolada da camada simulada para a camada inferior no dia “i” (mm H₂O);

Q_{gw} = quantidade de água que retorna ao curso d’água no dia “i” devido ao escoamento sub-superficial (mm H₂O).

3.5.3 Calibração e Validação

De acordo com Arnold *et al.* (2012a) a calibração pode ser definida como o processo para obter a melhor parametrização de um modelo para condições e características locais, de modo a reduzir a incerteza associada a predição realizada pelo modelo. A calibração do modelo ocorre através de uma escolha cuidadosa de valores para parâmetros de entrada do modelo – considerando suas respectivas faixas de incerteza – e comparando as predições do modelo (outputs) para um determinado conjunto de condições assumidas com dados observados para as mesmas condições. A exemplo, os autores citam a calibração, em escala de bacia hidrográfica, envolvendo fluxo. Os processos de fluxo contínuo são compostos pelo balanço hídrico do ciclo hidrológico, incluindo evapotranspiração, infiltração, escoamento superficial e fluxo de retorno. Havendo dados disponíveis para cada um desses processos, eles devem ser calibrados individualmente.

A calibração de um modelo hidrológico pode ocorrer de duas maneiras: manual e automática. Sarmento (2010) estabelece que para a primeira maneira, o conhecimento do

sistema que será modelado, tal como da estrutura do modelo, torna-se suficientes para efetuar a calibração. Para a segunda maneira, utiliza-se da modelagem inversa, onde os valores simulados são ajustados aos valores observados do fenômeno de interesse através de processos estatísticos. A autora cita que, a principal vantagem da utilização da calibração automática, é a de poder modelar sistemas dinâmicos e complexos que apresentem uma grande quantidade de variáveis, podendo representar de forma mais real o fenômeno a ser modelado.

Sing & Woolhiser (2002) atribuem três variáveis como essenciais para a calibração de qualquer modelo hidrológico, sendo elas: a função objetivo, a função de otimização e dados que permitam a calibração.

O modelo SWAT conta com uma extensão que permite a calibração automática: SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Procedures). O SWAT-CUP foi desenvolvido por Abbaspour *et al.* (2009) e aprimorado por Abbaspour *et al.* (2013).

De acordo com Abbaspour *et al.* (2013) a extensão SWAT-CUP conta com cinco algoritmos que permitem a realização da calibração automática, sendo eles: GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Algorithm), PARASOL (Parameter Solution), PSO (Particle Swarm Optimization) e MCMC (Markov chain e Monte Carlo). Ferrigo *et al.* (2013) propuseram descrições simplificadas para cada um dos cinco algoritmos, que serão explicitadas a seguir.

- GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation): Processo de calibração baseado na tese da equifinalidade, que afirma que a estrutura de um sistema qualquer, para qualquer intervalo de tempo, é um aspecto funcional mais complexo. O algoritmo reconhece a equivalência de diversos conjuntos de valores dos parâmetros para calibração em modelos distribuídos, utilizando funções de probabilidade específicas;
- SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting Algorithm*): Algoritmo que em sua estrutura compatibiliza as incertezas de todas as suas fontes, a exemplo das incertezas relativas a variáveis de entrada e dados medidos. Após a compatibilização das incertezas, o algoritmo quantifica através de um fator, que representa percentualmente a incerteza de predição;
- PARASOL (*Parameter Solution*): O algoritmo determina a incerteza paramétrica de modelos complexos através da utilização de um método de otimização de cálculo

estatístico. Para que a otimização ocorra, o algoritmo minimiza a função objetivo através de outro algoritmo, SCE-UA (*Schuffled Complex Evolution*), que é uma ferramenta de otimização global que utiliza a técnica *Hill-Climbing*;

- PSO (*Particle Swarm Optimization*): O algoritmo trabalha de modo que em uma iteração, diversos pontos do espaço de busca são avaliados por uma função de aptidão, sendo um algoritmo que possui seu método de simulação baseado em comportamento social de grupos;
- MCMC (Markov chain Monte Carlo): O algoritmo MCMC compara uma classe de algoritmos por uma distribuição de probabilidade, de modo que a partir das funções de probabilidade, geram-se estimativas precisas de intervalos de confiança para os parâmetros ajustados.

A validação de um modelo pode ser compreendida como o processo que visa demonstrar que o modelo é capaz de realizar simulações com precisão. Arnold et al. (2012a, apud Gan, 1997) elencaram quatro pontos que, em geral, a calibração e validação de um modelo hidrológico devem apresentar: (1) dados observados que incluam umidade, média e anos secos; (2) utilizar técnicas de avaliação múltipla; (3) calibrar todos os parâmetros a serem avaliados; e (4) realizar a verificação de que outros resultados importantes do modelo são razoáveis.

Nunes (2016) descreve que os processos de calibração e validação ocorrem, em geral, a partir de uma divisão da série dados disponíveis, onde parte dos dados serão utilizados para a calibração e parte para a validação, salientando que a divisão dos dados não deve gerar características diferentes para um processo em detrimento do outro.

3.6 ESTUDOS PRÉVIOS SOBRE AS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIBEIRÕES PAIVA E SANTA MARIA (DF/GO)

A bacia hidrográfica do presente estudo é composta de dois ribeirões, sendo eles: Paiva (DF/GO) e Santa Maria (DF/GO). Salienta-se que o primeiro é desprovido de estudos técnicos e científicos, ao passo que o segundo apresenta pouca quantidade de estudos científicos desenvolvidos.

Silva (2015) estudou a influência da educação ambiental como técnica para recuperação das nascentes do ribeirão Santa Maria (DF/GO). O autor salienta em sua tese que o processo de ocupação das nascentes do ribeirão, que ocorre desde a década de 1970, com o início das ocupações das cidades na porção sul do Distrito Federal e porção norte de Goiás, com destaque para: Novo Gama (GO), Valparaíso de Goiás (GO), Pedregal (GO), Luziânia (GO)

e Santa Maria (DF). Além disso, deve-se ressaltar que o mesmo obteve resultados satisfatórios para a conservação do ribeirão Santa Maria (DF/GO) através da metodologia de educação ambiental, que procedeu através da integração entre a sociedade civil e órgãos públicos.

Semrau (2017) analisou a fisiografia e a condição ambiental da bacia hidrográfica do ribeirão Santa Maria (DF/GO), além de monitorar a qualidade da água juntamente à população do município de Novo Gama (GO) através da metodologia da ciência cidadã. A autora concluiu que a qualidade da água do ribeirão Santa Maria (DF/GO) apresenta forte impacto proveniente da ocupação urbana, apresentando traços de contaminação por E. Coli e cargas orgânicas provenientes de esgotamento sanitário, sendo assim, conforme a resolução CONAMA n° 274/2000, imprópria para contato primário.

Por fim, Bogéa (2017) realizou a caracterização física e iniciou os estudos de modelagem hidrológica na bacia através do uso do modelo SWAT. Em seu estudo, realizou a simulação hidrológica sem a calibração do modelo com o intuito de primeiro contato com a bacia, obtendo resultados satisfatórios. Destaca-se que em seu trabalho, o autor explicita a condição precária da bacia quanto à dados disponíveis e a relevância da bacia em função da grande influência para com os municípios de Valparaíso de Goiás e Novo Gama, ambos pertencentes ao estado de Goiás.

4. METODOLOGIA

O presente projeto visa a caracterização ambiental e modelagem hidrológica das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) utilizando o modelo SWAT. A simulação hidrológica utilizou três condições: a condição atual das bacias hidrográficas e duas simulações para variar as condições do uso e ocupação do solo e qualidade da água a partir da construção de cenários, sendo um preservado e outro, antropizado. A metodologia utilizada segue o fluxograma apresentado na Figura 3.6.1

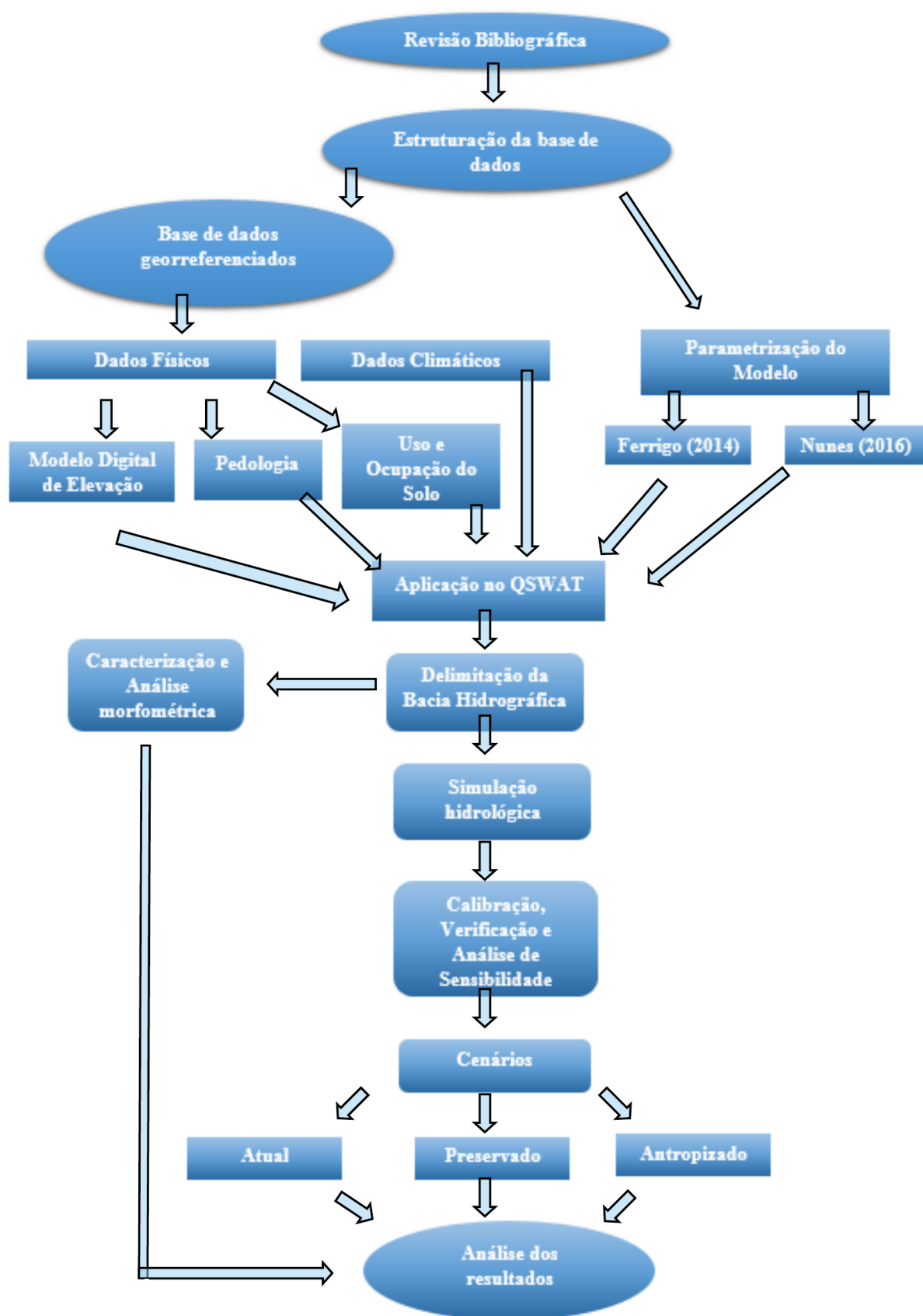


Figura 3.6.1 Fluxograma da metodologia de trabalho

4.1. ÁREA DE ESTUDO

4.1.1 Localização Geográfica

As bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria possuem uma área de 179,56 km² e abrangem três municípios do estado de Goiás: Luziânia, Valparaíso de Goiás e Novo Gama. Além dos três municípios, a bacia hidrográfica apresenta uma breve porção na extremidade sul do Distrito Federal (Figura 4.1.1). Destaca-se, que o ribeirão Santa Maria (DF/GO) apresenta início no Distrito Federal, em sua porção sul, prosseguindo até o estado de Goiás, sendo caracterizado como um ribeirão de domínio da União. O ribeirão Paiva, todavia, localiza-se inteiramente no estado de Goiás, tendo seu início no município de Novo Gama com seu exutório localizado no município de Luziânia.

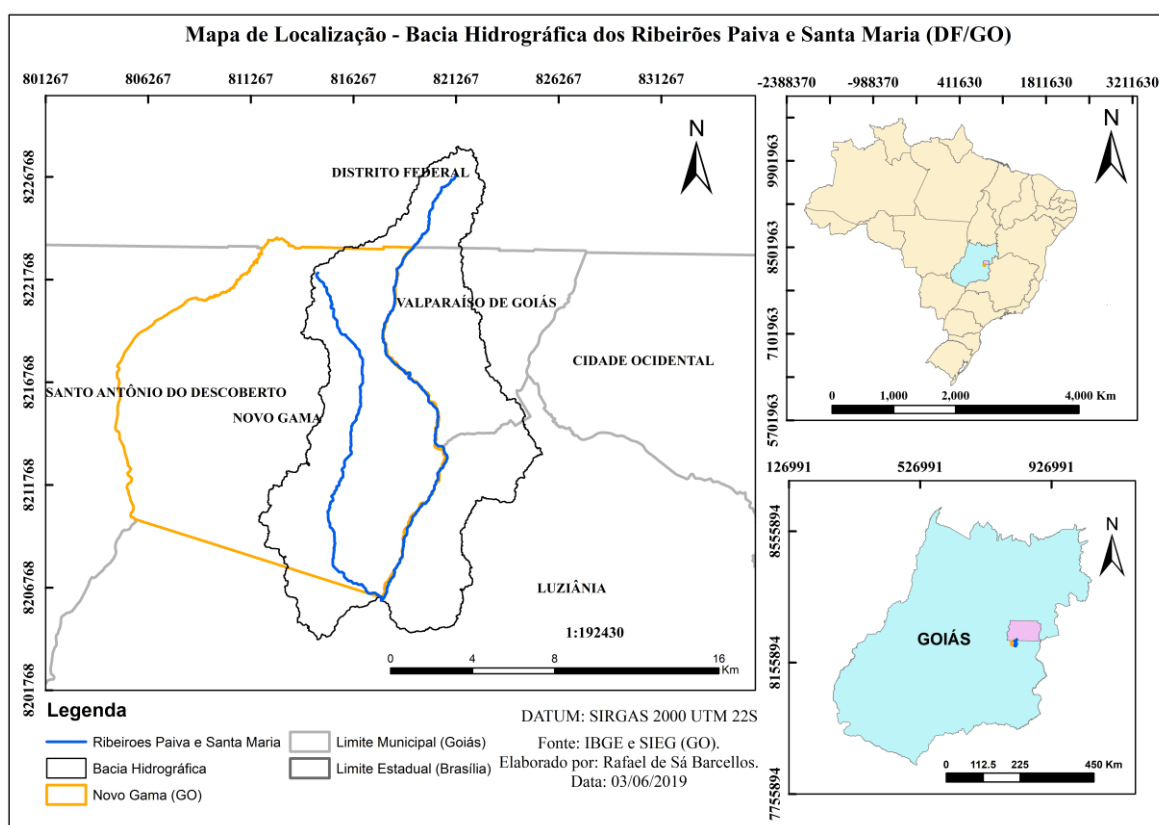


Figura 4.1.1 Mapa de localização geográfica das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).

4.1.2 Clima

Cardoso *et al.* (2014) realizaram a classificação climática de Koppen-Geiger para o estado de Goiás (GO) e Distrito Federal (DF), onde, para a localização da bacia hidrográfica dos

Ribeirões Paiva e Santa Maria há dois tipos de clima Koppen-Geiger predominantes: Am (clima de monção) e Aw (clima tropical com estação seca no inverno).

De acordo com McKnight (1996) os climas de tipo “Am” apresentam um mês mais seco, tipicamente após o solstício de inverno, com precipitações menores que 60 mm, mas com equivalência a mais de 4% da precipitação anual total. Os climas de tipo “Aw” apresentam uma estação mais seca no inverno ou verão, de modo que o mês mais seco apresenta precipitações inferiores a 60 mm, equivalente a menos de 4% da precipitação anual total.

Embrapa (1992), aponta que climas do tipo “Am” e “Aw” apresentem a temperatura do mês mais frio superior a 18°C.

A Figura 4.1.2 apresenta a classificação climática de Koppen Geiger para o Estado de Goiás e o Distrito Federal, sendo realizada por Cardoso *et al* (2014) em um estudo de caracterização e classificação climática para porções do Centro-Oeste.

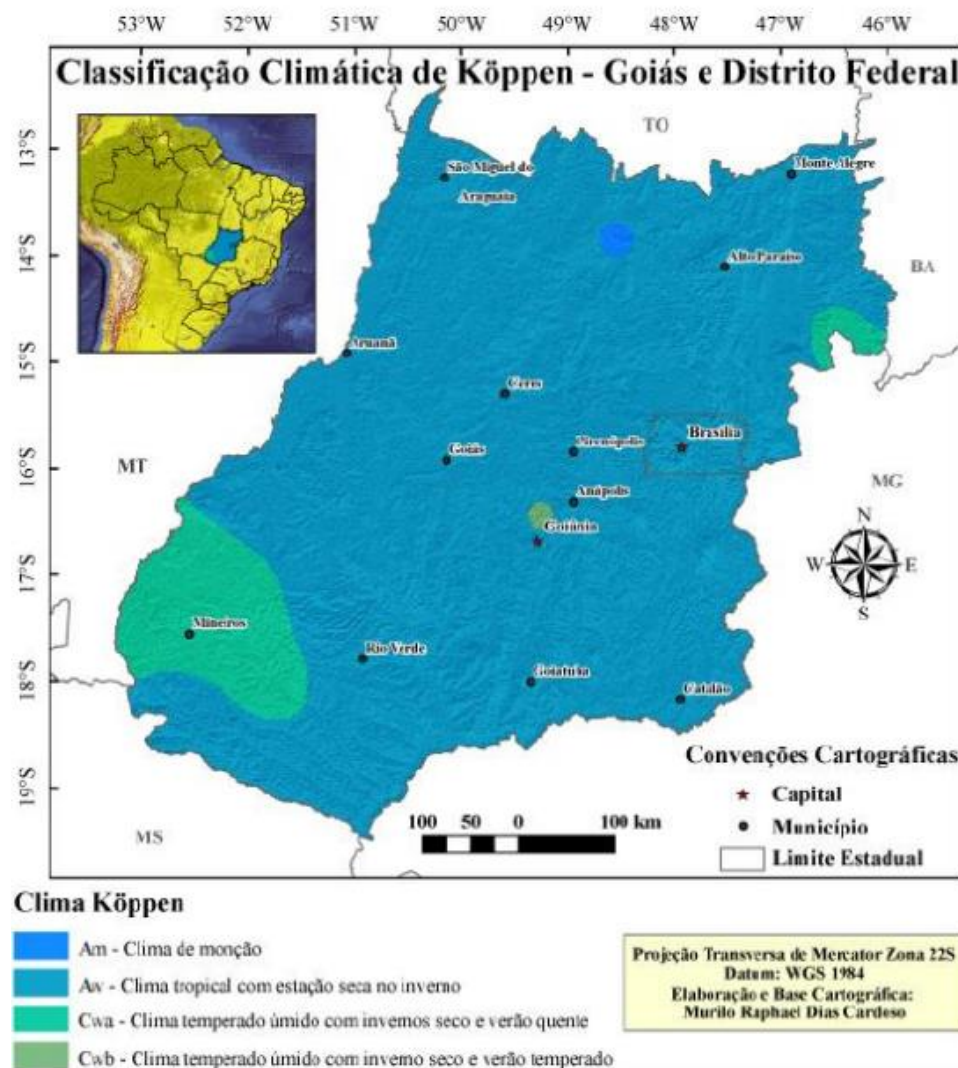


Figura 4.1.2 Classificação Climática de Koppen para o Goiás (GO) e Distrito Federal (DF).
Fonte: Cardoso *et al.* (2014).

4.1.3 Declividade

A declividade pode ser expressa como a variação altimétrica entre dois pontos da bacia hidrográfica em relação a distância entre os dois pontos, podendo ser expressa em graus ou em porcentagem.

De acordo com Embrapa (1979) os valores percentuais de declividade podem ser classificados conforme a Tabela 4.1.1.

Tabela 4.1.1 Classificação de declividade. Fonte: Embrapa (1979)

Declividade (%)	Classificação
0-3	Plano
3-8	Suave ondulado
8-20	Ondulado
20-45	Forte ondulado
45-75	Montanhoso
>75	Forte montanhoso

A declividade das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO), classificada conforme a Tabela 4.1.1 está apresentada na Tabela 4.1.2.

Tabela 4.1.2 Quantitativo de área das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) associados a classificação de declividade proposta por Embrapa (1979).

Declividade (%)	Classificação	Área da bacia hidrográfica (km ²)
0-3	Plano	16,35
3-8	Suave ondulado	94,95
8-20	Ondulado	59,24
20-45	Forte ondulado	8,54
45-75	Montanhoso	0,49
>75	Forte Montanhoso	0,02

A Figura 4.1.3 expressa o mapeamento da declividade das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).

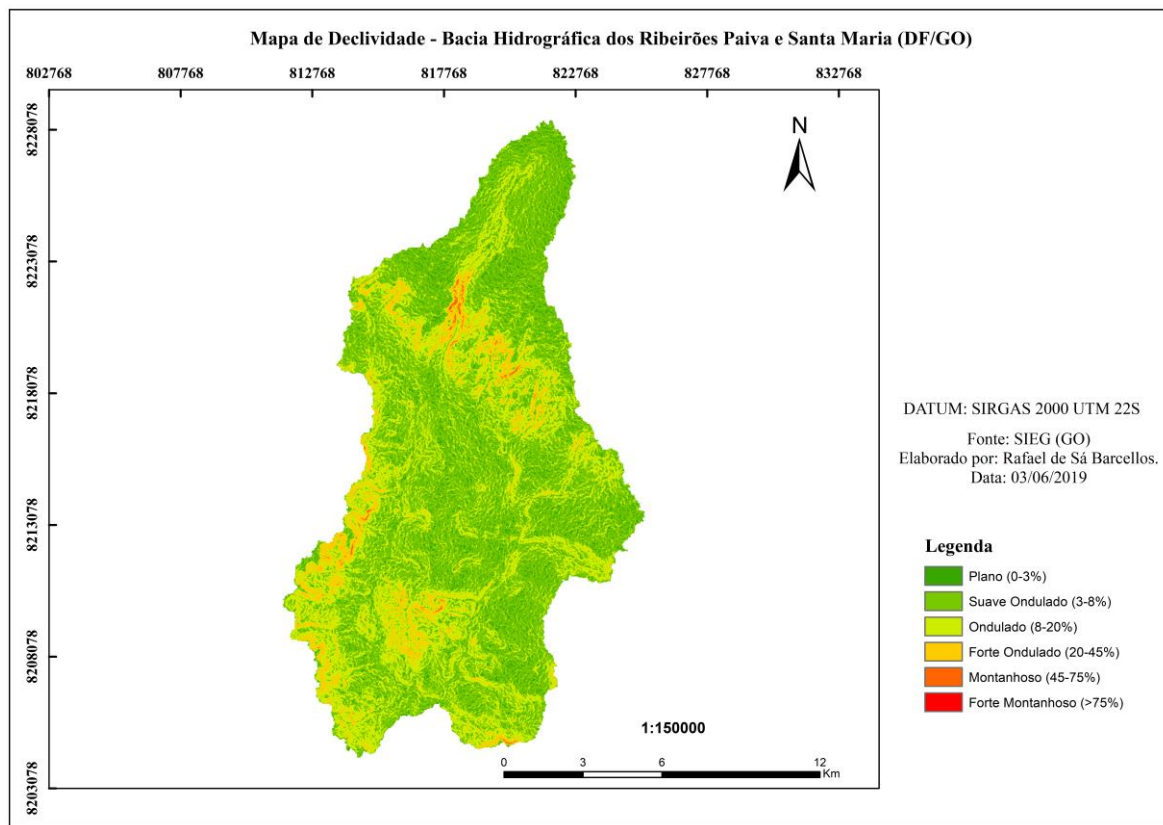


Figura 4.1.3 Mapa de declividade das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria.

4.1.4 Geomorfologia

De acordo com o Zoneamento Ecológico Econômico (ZEE) do estado de Goiás (GO), que engloba parte da porção sul do Distrito Federal (DF), a bacia hidrográfica apresenta uma unidade geomorfológica denominada de Superfície Regional de Aplainamento (SRAIIA), sendo dividida em três classes de dissecação: fo, fr e m. A primeira diz respeito a unidades geomorfológicas de dissecação forte, sendo bem desenvolvida. A segunda diz respeito a unidades de dissecação fracas e, por fim, a terceira diz respeito a unidades de dissecação médias. Latrubesse e Carvalho (2006) realizaram um estudo da Geomorfologia do Estado de Goiás (GO) e do Distrito Federal (DF), de modo que estabeleceram que as unidades geomorfológicas supracitadas ocorrem entre cotas de 900 a 1250 metros sobre rochas pré-cambrianas.

A Figura 4.1.4 representa o mapeamento geomorfológico das bacias hidrográficas dos rios Paiva e Santa Maria (DF/GO).

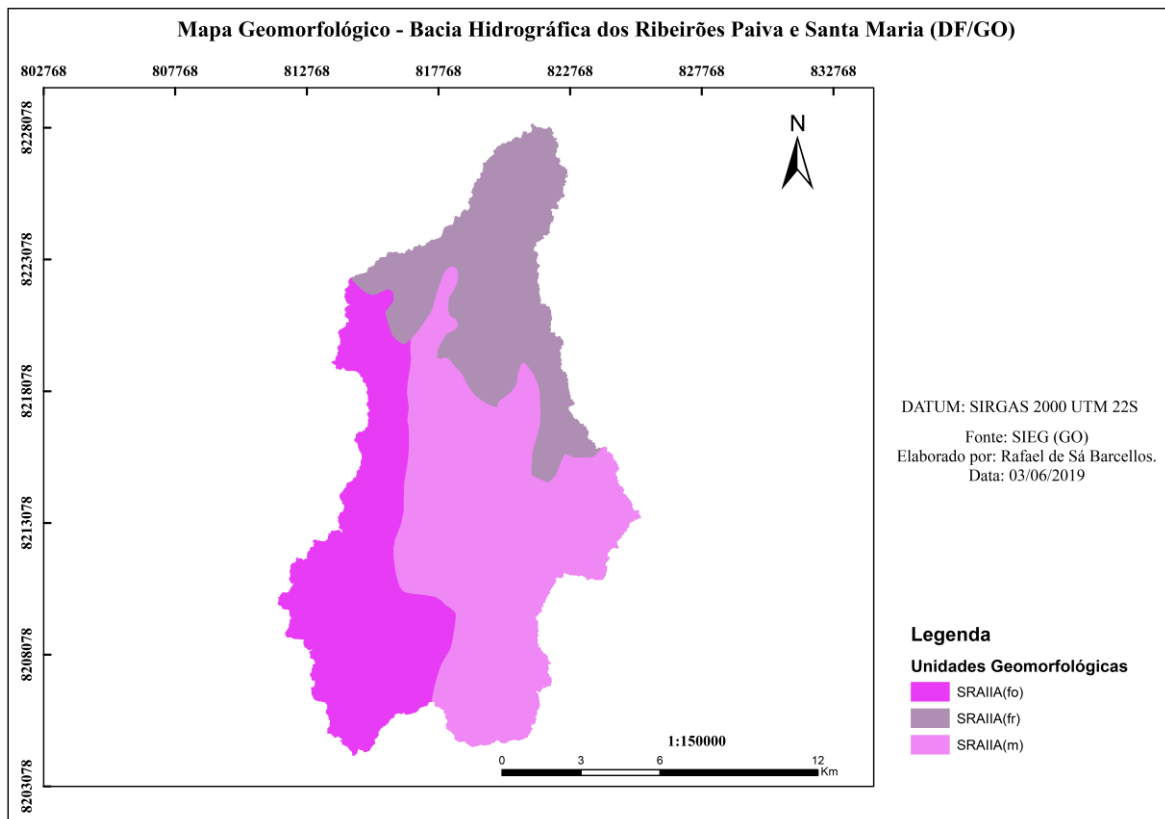


Figura 4.1.4 Mapa Geomorfológico das bacias hidrográficas dos rios Paiva e Santa Maria (DF/GO).

4.1.5 Pedologia

A bacia hidrográfica que abarca os rios Paiva e Santa Maria (DF/GO) é composta de três unidades pedológicas: Cambissolo Háptico Distrófico (CX), Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd). A descrição das unidades pedológicas foi estipulada por Santos *et al.* (2018).

A primeira unidade, que compõe, aproximadamente 4,87% em área da extensão da bacia hidrográfica, é identificada tipicamente em relevos fortes ondulados ou montanhosos, sendo uma formação que corrobora para formação de reservas nutricionais para a fauna e cultivos florestais. São solos que apresentam fertilidade natural com grande variação, apresentando limitações para uso, tais como: declives acentuados, pequena profundidade e grande ocorrência de pedras no maciço rochoso em subsuperfície. Em resumo, são classificados como solos com baixos teores de argila e fertilidade.

De acordo Embrapa (2017), cambissolos apresentam espessura mínima que varia entre 50 e 100 cm de profundidade, sendo uma opção de elevado potencial para atividade agrícola, desde que as correções químicas necessárias para tal sejam realizadas.

A segunda unidade, compõe cerca de 73,62% da extensão da bacia hidrográfica. De acordo com Embrapa (2017) é uma formação com tons avermelhados em função de seu elevado teor de espécies químicas de óxidos de ferro, apresentando grande profundidade e altos índice de porosidade, além de um aporte nutricional reduzido e baixa fertilidade.

Por fim, a terceira unidade corresponde a 0,47% da extensão da bacia hidrográfica, sendo uma formação caracterizada por estar em zonas de revelo plano, suave ondulado ou ondulado e típico de áreas com drenagens bem definidas, apresentando elevada profundidade. Salienta-se que são solos com limitações química, apresentando baixos teores de fósforo, o que confere baixa fertilidade a esse tipo de formação.

A Figura 4.1.5 apresenta o mapeamento pedológico das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).

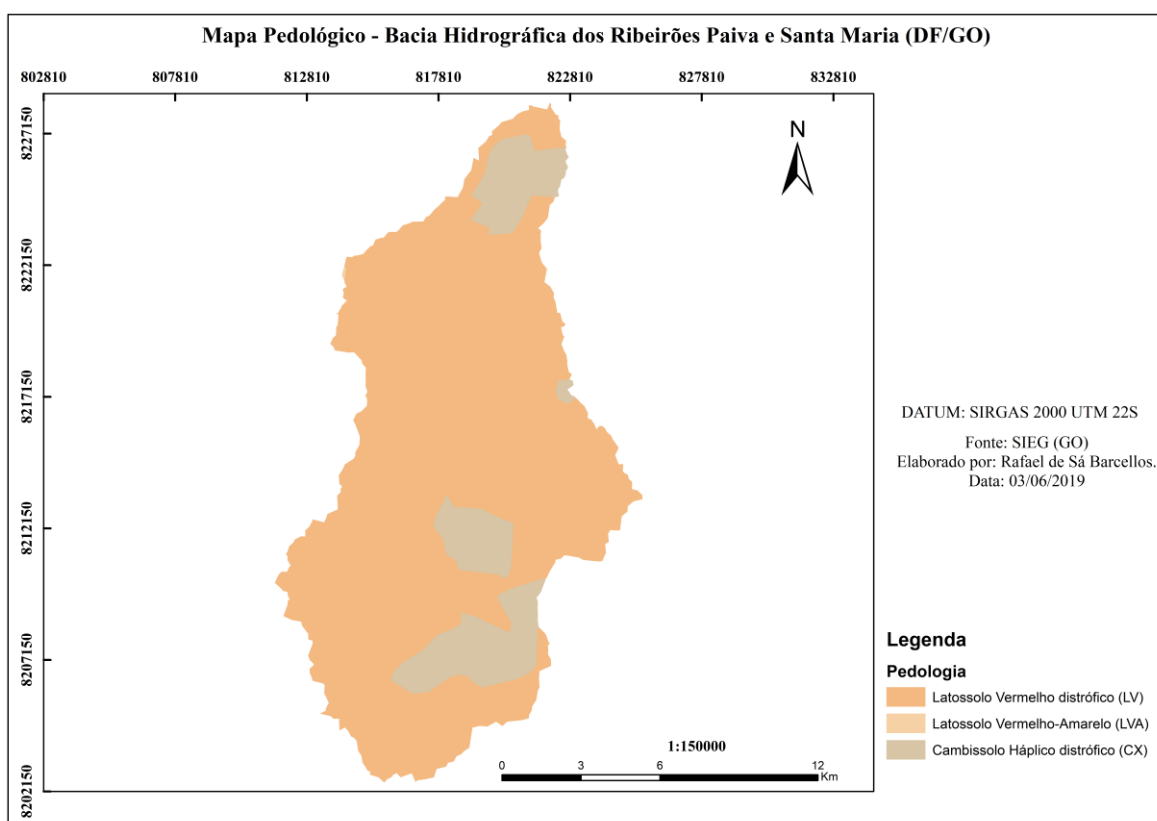


Figura 4.1.5 Mapa pedológico das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria.

4.1.6 Hidrologia

As bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) não apresentam estações fluviométricas, sendo classificadas como bacias hidrográficas não monitoradas.

A Figura 4.1.6 retrata a drenagem, apresentando os canais tributários, para as bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO). De acordo com o Plano de Ações de Recursos Hídricos da bacia do Paranaíba (2013), os ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) são ribeirões de domínio da União - em função de serem transfronteiriços considerando os estados do Distrito Federal e Goiás – e que compõe a Unidade de Gestão Hídrica Corumbá.

A Unidade de Gestão Hídrica Corumbá possui área de 30.791 km², equivalente a cerca de 10% da área total do Estado de Goiás. Ao todo, abrange 34 municípios, todavia, destaca-se que os municípios de Valparaíso de Goiás, Novo Gama e Luziânia, estão totalmente inseridos na área da UGH Corumbá. De acordo com o Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Paranaíba (2013), a UGH Corumbá apresenta corpos hídricos que, de acordo com a Resolução CONAMA 357/05, são enquadrados como corpos hídricos de Classe 2. A descrição de corpos hídricos de Classe 2 pode ser consultada através da Resolução CONAMA 357/05, capítulo II, seção I, Artigo 4º.

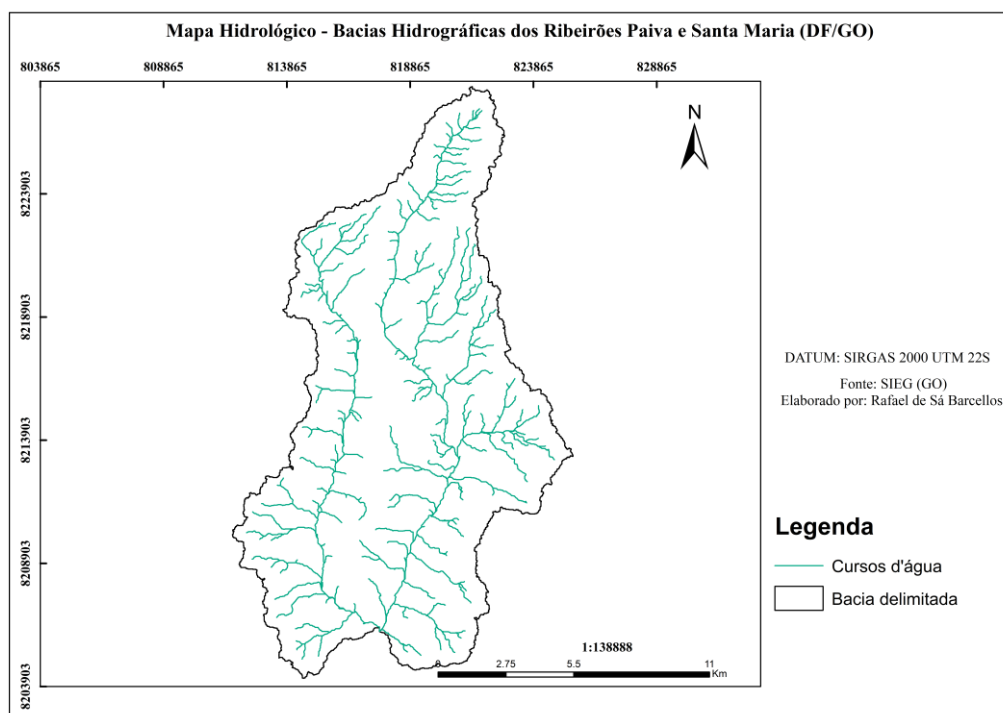


Figura 4.1.6 Mapa hidrológico das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria

4.1.7 Uso e ocupação do solo

A caracterização de uso e ocupação do solo foi obtida a partir do Zoneamento Ecológico e Econômico (ZEE) do estado de Goiás (GO) do ano de 2013. Salienta-se que, embora seja um estudo relativo ao Estado de Goiás, parte dos produtos disponibilizados abarcam a porção sul do Distrito Federal.

A Figura 4.1.7 retrata como se dão os usos e ocupação do solo das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).

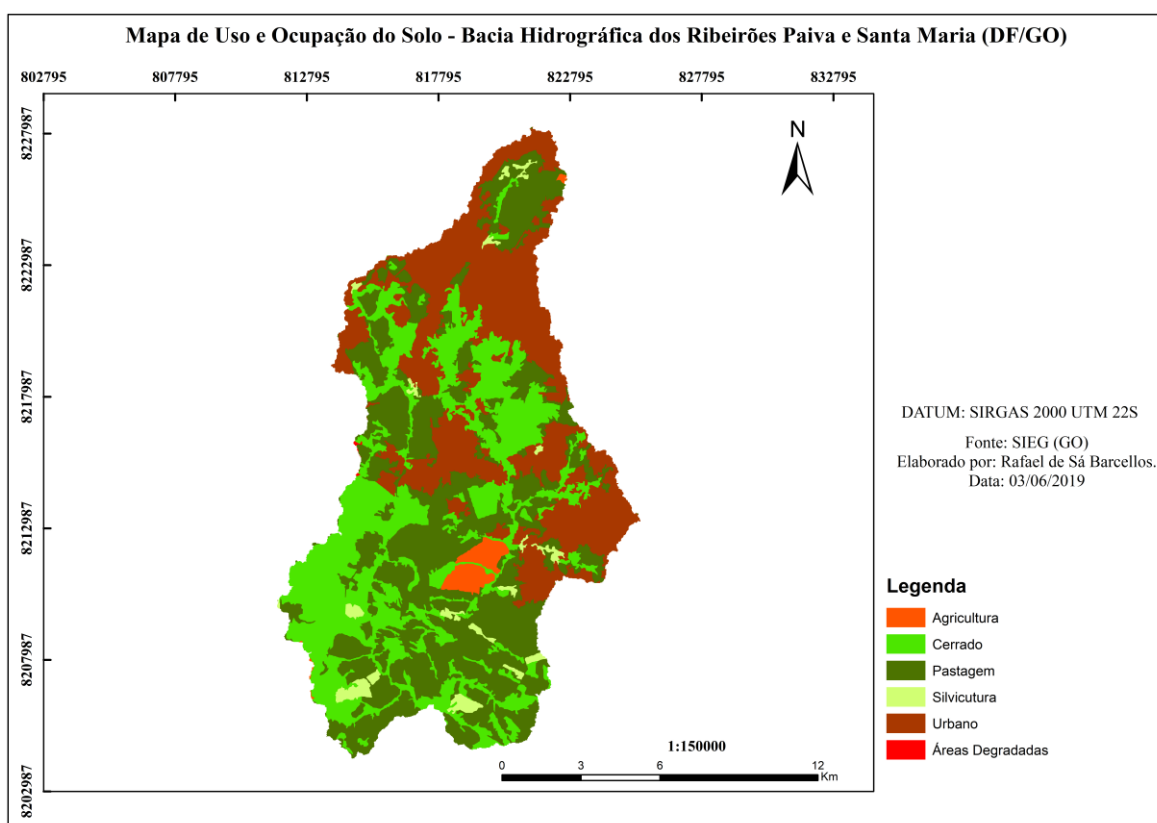


Figura 4.1.7 Mapa de uso e ocupação do solo das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).

A ocupação do solo da bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) restringe-se basicamente a: agricultura (3,04 km²), cerrado (53,34 km²), pastagem (67,47 km²), silvicultura (3,76 km²), áreas urbanas (51,87 km²) e áreas degradadas (0,08 km²). Percentualmente, os usos supracitados correspondem, respectivamente: 1,7 %, 29,70%, 37,57%, 2,09%, 28,88% e 2,06%.

4.2. ESTRUTURAÇÃO DA BASE DE DADOS

A estruturação de dados do presente trabalho foi distinguida entre a base mínima necessária para que o modelo SWAT realizasse as simulações hidrológicas e a base elaborada pelo

autor para a realização dos mapas temáticos que constam nos itens: 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4, 4.1.5, 4.1.6 e 4.1.7.

As bases de dados utilizadas pelo modelo SWAT foram elaboradas por Ferrigo (2014) e Nunes (2016), disponibilizada pelo Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH/UnB), da Universidade de Brasília. Ferrigo (2014) e Nunes (2016) modificaram a base de dados original do modelo SWAT, que é uma base de dados padrão que acompanha o programa e apresenta informações de solo e uso e ocupação do solo para os Estados Unidos. Assim, os autores citados realizaram as modificações necessárias de modo a gerarem bases de dados para a região do Distrito Federal e para o bioma Cerrado. A parametrização realizada por Ferrigo (2014) e Nunes (2016) basearam-se no trabalho de Lima *et al* (2013).

Os dados vetoriais georreferenciados utilizados para a confecção dos mapas temáticos foram obtidos através do Sistema Estadual de Geoprocessamento de Goiás (SIEG/GO), sendo manipulados para contemplarem a área de estudo do presente trabalho.

Os dados climáticos foram calculados de acordo com o manual do modelo SWAT proposto por Arnold *et al.* (2011). A Tabela 4.2.1 sintetiza os dados utilizados no presente trabalho.

Tabela 4.2.1 Descrição dos dados utilizados

Dados	Fonte	Resolução/Escala
Modelo Digital de Elevação (MDE)	<i>Alaska Satellite Facility's</i> (ASF)	12,5 metros
Pedologia	Sistema Estadual de Geoinformações de Goiás (SIEG)	1:250.000
Uso e Ocupação do Solo	Sistema Estadual de Geoinformações de Goiás (SIEG)	1:250.000
Climáticos	<i>Global Weather DATA for SWAT</i> (WGN)	-
SWAT <i>database</i>	Ferrigo (2014) e Nunes (2016)	-

4.3 CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE MORFOMÉTRICA

A caracterização e análise morfométrica do presente estudo foram realizadas tomando como base os estudos de Cherem (2008), Souza (2015) e Rocha *et al.* (2014), sendo calculados e analisados os parâmetros morfométricos descritos no item 3.2.1 do presente trabalho.

4.4 SIMULAÇÕES

A descrição do processo de simulação hidrológica das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria foi realizada considerando-as como uma única unidade hidrográfica. Assim, sendo tratadas na metodologia, como, apenas, uma bacia hidrográfica.

As simulações realizadas com o modelo SWAT tiveram o intuito de gerar um entendimento preliminar sobre a hidrologia da bacia hidrográfica a partir da caracterização do balanço hídrico. As simulações realizadas foram divididas em duas classes: inicial (sem calibração) e com calibração.

A simulação inicial ocorreu após a base de dados ser estruturada, a partir dos melhores dados para a parametrização disponíveis para a região da área de estudo, e com subsequente aplicação do modelo SWAT, sendo realizada em quatro etapas: delimitação da bacia hidrográfica, criação das URHs, edição dos dados de entrada e execução do modelo.

A delimitação da bacia hidrográfica ocorreu a partir do MDE, onde foram gerados a rede de acumulação, direção de fluxo, rede de drenagem e sub-bacias. O exutório da bacia foi gerado através da análise visual da confluência dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO), sendo demarcado no ponto de ribeirão Santa Maria (DF/GO) após receber as águas do ribeirão Paiva (GO).

Posterior a delimitação da bacia hidrográfica, procedeu-se a criação das Unidades de Resposta Hidrológica (URHs), um cruzamento único entre tipo de solo, uso do solo e declividade. A partir da sobreposição, em diversas microrregiões distintas, onde, para cada microrregião gerada, tem-se associado um tipo de solo, uma classe de solo e valor de declividade.

Por fim, os dados climáticos (temperaturas mínimas e máximas, velocidade do vento, radiação solar, precipitação e umidade relativa do ar) foram adicionados ao modelo. Após a inserção dos dados climáticos, procedeu-se a simulação inicial do modelo entre janeiro de 2006 e dezembro de 2013, tomando os três primeiros anos (2006, 2007 e 2008) como período de aquecimento do modelo. A adoção dos três primeiros anos de aquecimento, de acordo

com Ferrigo (2014), conforme testes realizados para as bacias do Distrito Federal, minimiza a chance de erros no processamento afim de aumentar a precisão da simulação.

Por fim, após a simulação inicial, realizou-se a análise de sensibilidade do modelo e, por conseguinte, o processo de calibração seguido da simulação calibrada.

4.4.1 Análise de Sensibilidade e Calibração

Parte da motivação relacionada à escolha da área de estudo para o desenvolvimento do presente trabalho, as bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO), refere-se à baixa disponibilidade de dados disponíveis, marcada pela diferença marcante entre a riqueza de dados hidrológicos disponíveis no Distrito Federal e a ausência de monitoramento nas áreas das bacias hidrográficas localizadas a jusante da divisa entre o Distrito Federal e o Estado de Goiás.

Justifica-se, dessa forma, a escolha da área de estudo pela necessidade de geração de informações sobre as bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) de maior relevância para a gestão dessas unidades hídricas.

A bacia hidrográfica do ribeirão Paiva não apresenta estações de monitoramento hidrológico. A bacia hidrográfica do ribeirão Santa Maria apresenta uma única estação de monitoramento hidrológico localizada no Distrito Federal, antes da divisa com o Estado de Goiás, estação gerenciada pela ADASA. Esta estação drena uma área relativamente pequena da bacia hidrográfica, localizada na região a montante da bacia. Os dados disponíveis sobre a estação são escassos, intermitentes, não possibilitando sua utilização para a calibração de modelos hidrológicos.

Dessa forma, em função de o presente trabalho apresentar um enfoque de primeira aproximação, gerando informações iniciais sobre as unidades hidrográficas estudadas, optou-se por utilizar dados regionais de vazões de bacias hidrográficas vizinhas, próximas à área de estudo, para contribuir com o entendimento dos processos hidrológicos nessas unidades.

Realizou-se uma busca por dados de estações fluviométricas em bacias vizinhas em bancos de dados públicos. Acessando-se o *hidroweb*, a base de dados do Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos (SNIRH), que compete a Agência Nacional de Águas (ANA), foram encontradas algumas estações de monitoramento hidrológico nas proximidades.

Como critérios de busca pelas estações, adotou-se que deveriam apresentar pelo menos dois anos de dados contínuos de vazão e que estivessem próximas às bacias hidrográficas analisadas no presente trabalho, apresentando comportamento hidrológico semelhante. Observou-se que as bacias hidrográficas próximas, apesar de apresentarem extensões espaciais diferenciadas, todas apresentavam as regiões de cabeceira no Distrito Federal e padrões semelhantes de variações de relevo.

Tendo em vista que o modelo SWAT, ao simular as bacias hidrográficas do Distrito Federal, apresenta uma maior tendência de superestimar os dados de vazão nos períodos de maior precipitação e subestimar os dados no períodos de recessão, conforme observado nos trabalhos de Ferrigo (2014) e Nunes (2016), além de simples comparação entre os dados simulados com dados regionais, procedimento usualmente realizado no processo de regionalização de vazões, no presente trabalho optou-se por realizar um “teste inicial de calibração” da bacia do ribeirão Santa Maria (DF/GO) (contemplando a área das duas bacias estudadas – bacias dos ribeirões Paiva e Santa Maria) a partir dos dados regionais de vazão.

Apesar do tipo de procedimento descrito não permitir que os dados obtidos pela calibração do modelo gerem maior confiabilidade aos resultados da modelagem, o enfoque do procedimento foi de, apenas, tentar minimizar os erros já conhecidos obtidos pelas aplicações iniciais do modelo SWAT em bacias hidrográficas da região e, a partir dessa “melhoria”, analisar o comportamento hidrológico das bacias estudadas de maneira mais próxima à realidade. Dessa forma, os procedimentos descritos como calibração do modelo no presente trabalho referem-se, na realidade, a um “teste para correção e minimização dos erros iniciais do modelo SWAT”.

Após a busca das estações que atendessem as exigências citadas anteriormente, foi efetuada uma comparação dos dados de vazão. Após a comparação por valores de vazão, tomou-se os valores de vazão da estação fluviométrica pertencente a bacia escolhida e utilizou-se para a calibração do modelo SWAT.

Após a realização dessa etapa, os procedimentos descritos na sequência, apesar de se tratarem de um teste para correção e minimização dos erros iniciais do modelo SWAT, referem-se aos procedimentos normais de calibração de bacias hidrográficas instrumentadas.

Assim, após a aplicação inicial do modelo SWAT, procedeu-se a calibração com os dados observados referentes à bacia vizinha escolhida, a fim de ajustar o modelo e obter melhores

resultados. Salienta-se que a calibração do modelo realizada através de um teste de aproximação inicial.

Para realizar a calibração e análise de sensibilidade do modelo SWAT, utilizou-se o software SWAT-CUP 2019 – versão 5.2.1.1. O programa apresenta diversos algoritmos que permitem a calibração, conforme explicita o item 3.5.3 do presente trabalho, todavia, fora escolhido e utilizado o algoritmo SUFI-2. A escolha do algoritmo SUFI-2 pauta-se nos estudos de Ferrigo (2014), Costa (2018) e Nunes (2016).

A Tabela 4.4.1 apresenta os parâmetros propostos por Ferrigo (2014) em seu estudo, que foram utilizados no presente trabalho durante a etapa de calibração.

Tabela 4.4.1 Parâmetros utilizados para calibração e seus respectivos intervalos máximos e mínimos de variação. Fonte: Ferrigo (2014).

Parâmetro	Descrição	Unidade	Valores Iniciais	Método	Intervalo	
					Mínimo	Máximo
CN2	Curva número na condição II	adim*	50 (média)	x	-0,3	0,2
ALPHA_BF	Constante de recessão do fluxo de base	dias	0.0048	=	0	1
GW_DELAY	Tempo de retardo da água subterrânea	dias	31	+	-20	450
GWQMN	Limiar da profundidade da água no aquífero superficial necessária para o fluxo de retorno ocorrer	mm	0	=	0	1228
GW_REVAP	Coefficiente "revap" de água subterrânea	adim	0,02	=	0,02	0,1
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo	adim	0,95	=	0,4	1
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo	mm/mm	0,12 (média)	x	-0,2	0,5
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo	mm/h	932 (média)	x	-1,95	0,8
SOL_BD	Densidade aparente do solo	[g/cm ³]	0,95 (média)	x	-0,93	-0,6
SHALLST	Altura inicial da água no aquífero raso	mm	1000	=	1000	5000
GWHT	Altura inicial da água subterrânea	mm	12	=	0	25
DEEPST	Altura inicial da água no aquífero profundo	mm	2000	=	0	3000
REVAPMN	Profundidade em aquífero profundo para que aconteça o "revap"	mm	1	=	0	500
ANION_EXCL	Fração de porosidade (espaços vazios) a partir da qual os ânions são excluídos.	adim	0,5	=	0,1	1

*adim: adimensional; x: multiplicar; =: igualar; +: adicionar.

A calibração ocorreu em dois momentos: o primeiro realizado com 500 simulações com base nos valores dos parâmetros estipulados por Ferrigo (2014), com o intuito de verificar os dez

parâmetros mais sensíveis para a calibração das bacias hidrográficas dos Ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO); e o segundo após a análise de sensibilidade.

O SWAT-CUP fora ajustado para realizar 1000 simulações que corresponderiam a uma iteração. Ao final de cada iteração, os valores dos parâmetros eram conferidos com os valores máximos e mínimos da Tabela 6, e, caso não estivessem entre os máximos e mínimos, eram reajustados para o intervalo e uma nova iteração era realizada. O processo foi repetido até que os valores dos parâmetros resultantes da calibração estivessem dentro das faixas propostas por Ferrigo (2014).

Com o intuito de analisar a eficiência do processo de calibração, fora adotado o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE). O coeficiente pode ser calculado por meio da equação abaixo:

$$NSE = 1 - \left[\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2 / \sum_{i=1}^n (E_m - E_{sméd})^2 \right] \quad (14)$$

Onde:

E_m = valor do evento observado;

E_s = valor do evento simulado pelo modelo;

$E_{sméd}$ = valor médio do evento observado no período de simulação;

n = número de simulações.

Segundo Moriasi et al. (2007), o NSE apresenta valores no intervalo de $-\infty$ a 1, de modo que quanto mais próximo de 1, melhor foi a calibração e mais satisfatório o resultado obtido. Valores de NSE abaixo de 0,5 são ditos como insatisfatórios, visto que explicitam que os resultados observados e simulados apresentam discrepância significativa, demonstrando a necessidade de que o processo de calibração seja refeito. A Tabela 4.4.2 apresenta a classificação da performance de calibração a partir dos valores de NSE.

Tabela 4.4.2 Classificação da performance de calibração utilizando coeficiente NSE para passo mensal. Adaptado de Moriasi *et al.* (2007).

Performance	NSE
Muito Bom	$0,75 \leq NSE \leq 1$
Bom	$0,65 \leq NSE \leq 0,75$
Satisfatório	$0,50 \leq NSE \leq 0,60$
Insatisfatório	$NSE \leq 0,50$

Por fim, realizou-se a análise de sensibilidade, de modo a identificar os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade para o processo de calibração. A análise realizada pelo SWAT-CUP pode ocorrer de duas formas: global e individual.

A análise global ocorre através da aplicação de dois testes e que retornam dois resultados: o *t-stat* e o *p-value*. De acordo com Abbaspour (2013), o *t-stat* demonstra de maneira proporcional a sensibilidade do parâmetro com seu valor, ou seja, parâmetros com maior valor são mais sensíveis; e o *p-value* que retorna a significância da sensibilidade, onde, valores mais próximos de zero indicam que a significância do parâmetro é maior. O método de análise individual, de acordo com Ferrigo (2014) ocorre a partir da variação de um parâmetro de maior sensibilidade enquanto os outros permanecem com valores constantes.

A partir dos resultados da análise de sensibilidade, foram selecionados dez parâmetros classificados como mais sensíveis. Diante disso, procedeu-se ao processo de calibração, onde uma iteração correspondeu a 1000 simulações, objetivando o NSE com passo mensal. As iterações foram realizadas e ajustadas considerando os valores dos parâmetros propostos por Ferrigo (2014), onde, a cada iteração, observou-se os resultados propostos pelo SWAT-CUP e, para valores de mínimo ou máximo fora dos propostos pela autora supracitada, a iteração era refeita com a modificação do parâmetro.

4.4.2 Cenários

Para avaliar a influência das atividades antrópicas no balanço hídrico da bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO), após o procedimento de calibração (correção dos erros iniciais do modelo SWAT), foram avaliadas duas possibilidades de cenários hidrológicos hipotéticos para a área de estudo. Na elaboração desses cenários foram adicionadas duas variações de uso do solo para a realização de novas simulações com o modelo SWAT: a primeira considerando um cenário sem atividades humanas, sendo um cenário ideal e com a bacia hidrográfica totalmente preservada, totalmente coberta por vegetação natural do bioma Cerrado. A Figura 4.4.2 apresenta a substituição feita na condição de uso e ocupação do solo das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) para o cenário preservado.

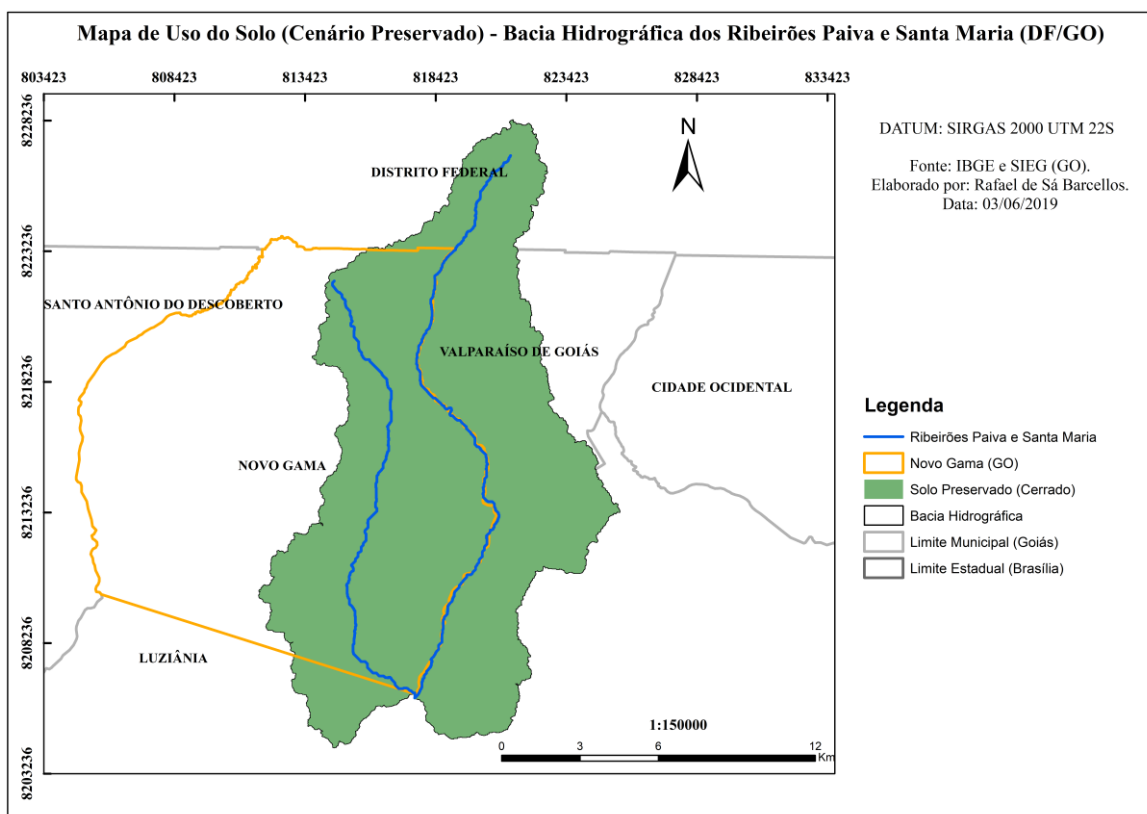


Figura 4.4.2 Mapa de uso e ocupação do solo alterado para a construção do cenário preservado das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).

O segundo cenário foi elaborado imaginando-se uma possível condição futura da bacia hidrográfica, onde as áreas de vegetação natural remanescentes seriam totalmente substituídas por áreas antropizadas, em função da expansão das atividades agrícolas e da urbanização. A Figura 4.4.3 apresenta a substituição feita na condição de uso e ocupação do solo das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) para o cenário antropizado.

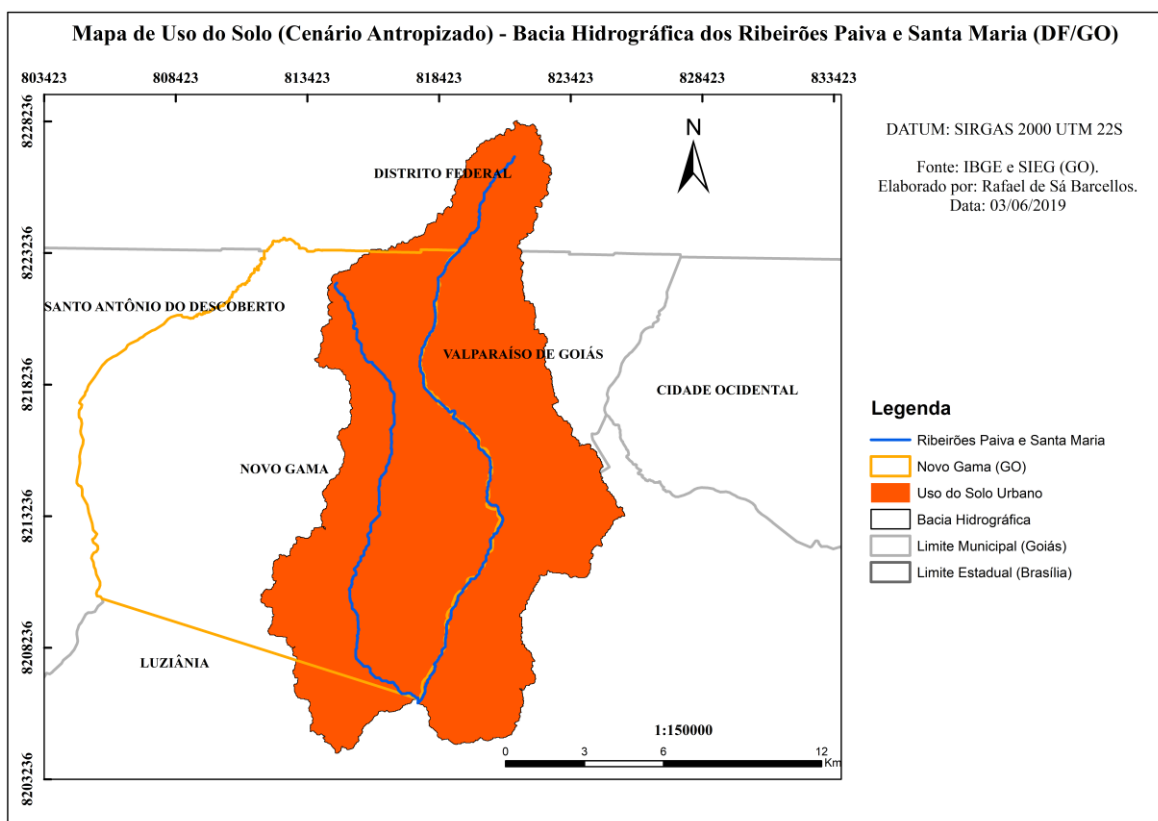


Figura 4.4.3 Mapa de uso e ocupação do solo alterado para a construção do cenário antropizado das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).

A geração dos cenários ocorreu através de modificações nos mapas de uso e ocupação do solo de entrada do modelo SWAT, conforme exposto pelas Figuras 4.4.2 e 4.4.3. Para a geração do cenário ideal, toda as classes de uso e ocupação do solo foram substituídas pelo bioma Cerrado e para geração do cenário antropizado, todas as classes de uso e ocupação do solo foram substituídas por áreas urbanas. Diante disso, fora realizada a comparação do cenário ideal, com a situação atual (realizada na simulação inicial do modelo) e o cenário antropizado.

Por fim, após as simulações dos dois cenários supracitados, obteve-se valores de vazão e balanço hídrico correspondentes a cada cenário, que foram comparados conjuntamente para o intervalo dos anos de 2009 a 2013.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo encontram-se a apresentação dos resultados obtidos, tal como a discussão dos mesmos. O capítulo encontra-se estruturado apresentando, inicialmente, os resultados e discussões da morfometria da bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO). Posteriormente, encontram-se dispostos os resultados da modelagem com o modelo SWAT, sendo divididos em seis sub tópicos, sendo eles: sub-bacias hidrográficas e unidades de resposta hidrológicas; simulação inicial; análise de sensibilidade; calibração; simulações com calibração e cenários.

5.1 Caracterização e análise morfométrica das bacias hidrográficas

Os resultados obtidos através dos cálculos dos parâmetros morfométricos descritos no item 3.2.1 do presente trabalho estão apresentados na Tabela 5.1.1.

Tabela 5.1.1 Valores dos parâmetros morfométricos para a bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).

Variável Morfométrica	Símbolo	Unidade	Valor
Área da bacia	A	km ²	179,56
Perímetro	P	Km	106,97
Comprimento total dos canais	Lt	Km	104,15
Comprimento do canal principal	L	Km	31,05
Hierarquia fluvial	Hf	*	4
Magnitude fluvial	Mf	*	10
Relação de Bifurcação	Rb	*	0,5
Relação dos comprimentos médios	RL _m	*	0,76
Índice de sinuosidade	I _s	*	1,32
Índice de circularidade	I _c	*	0,19
Densidade hidrográfica	D _h	Canais/km ²	0,56
Densidade de drenagem	D _d	Km/km ²	0,59
Relação entre as áreas da bacia	R _A	*	0,45
Coeficiente de manutenção	C _m	Km	1,67
Amplitude Altimétrica	H _m	m	450
Índice de rugosidade	Ir	*	0,75
Declividade média	D _m	m	1027,5

*parâmetro adimensional

A curva hipsométrica, que retrata a variação da declividade média ao longo da bacia hidrográfica, e a integral hipsométrica, que calcula o percentual de área acumulada ao longo de trechos de declividade, ou seja, a área abaixo da curva, encontram-se na Figura 5.1.1

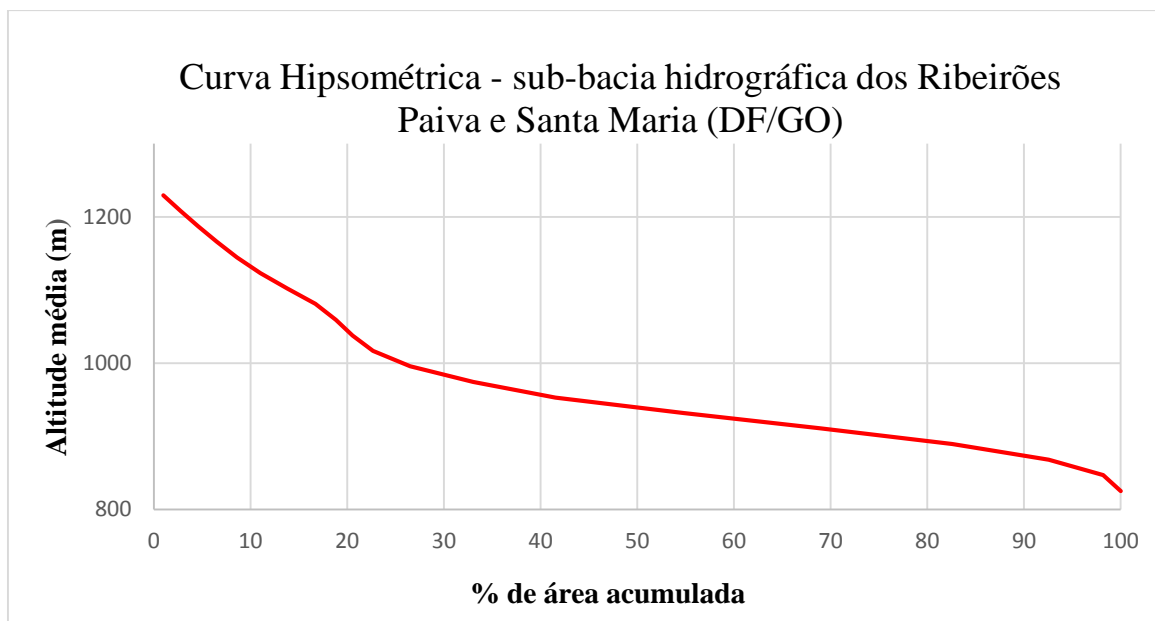


Figura 5.1.1 Curva e Integral Hipsométrica da sub-bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO)

A bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) apresenta uma área de 179,56 km², sendo esse o valor da área de drenagem da sub-bacia projetada em plano horizontal. O perímetro da bacia é de 106,97 km, que, conforme a aplicação da metodologia de Strahler (1957), representa uma hierarquia fluvial de quarta (4ª) ordem.

O índice de sinuosidade (I_s) da sub-bacia apresentou valor de 1,01, denotando a disposição geométrica dos canais da rede de drenagem da sub-bacia. De acordo com Christofolleti (1980), esse índice pode ser classificado em quatro classes: (1) reto (índice de sinuosidade menor que 20%); (2) muito reto (índice de sinuosidade variando entre 20 e 29%); (3) divagante (índice de sinuosidade variando de 30 a 39%); (4) sinuoso (índice de sinuosidade variando entre 40 e 49,95%); e (5) muito sinuoso (índice de sinuosidade acima de 50%). Assim, diante do exposto, infere-se que para a sub-bacia do presente estudo, os canais podem ser classificados como divagantes.

O índice de circularidade das bacias hidrográficas apresentou valor de 0,19. Com isso, pode-se concluir que o formato geométrico da sub-bacia não é circular.

A densidade hidrográfica das bacias hidrográficas apresentou valor de 0,56, explicitando a quantidade de canais a cada quilometro quadrado de área. Conforme a metodologia proposta por Freitas (1952) pode-se afirmar que a partir do valor encontrado, as bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) apresentam potencial para geração de novos cursos d'água.

A densidade de drenagem calculada apresentou valor de 0,59 canais a cada quilometro quadrado de área das sub-bacia hidrográfica, denotando, de acordo com Antoneli e Thomaz (2007) a eficiência dos canais de drenagem da bacia hidrográfica. Villela e Mattos (1975) caracterizaram a eficiência da rede de drenagem de bacias hidrográficas a partir dos valores de densidade de drenagem, onde, valores inferiores a 0,5 km/km² indicam bacias de drenagem pobre. Bacias com densidade de drenagem entre 0,5 e 1,5 km/km² apresentam drenagem regular. Bacias hidrográficas com densidade de drenagem entre 1,5 e 2,5 km/km² apresentam drenagem, entre 2,5 e 3,5 km/km² drenagem muito boa e acima de 3,5 km/km² excepcionalmente boas. Assim, diante do valor obtido para as bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO), pode-se classificar sua densidade de drenagem como regular.

O coeficiente de manutenção calculado fora de 1,67 km, representando o quantitativo necessário em comprimento para que a manutenção do escoamento da água na sub-bacia ocorra. Costa *et al.* (2014) obtiveram valores inferiores ao do presente estudo, de modo a justificarem que valores inferiores se correlacionam com baixos valores de precipitação, demandando uma menor necessidade de manutenção do escoamento da bacia.

A amplitude altimétrica calculada, dada pela diferença entre os valores de maior e menor declive, fora de 450 metros.

O índice de rugosidade calculado fora de 0,75. Leite e Rocha (2016) ao estudarem a bacia hidrográfica do Rio Vieira, na mesorregião norte do Estado de Minas Gerais (MG), obtiveram valores inferiores ao do presente estudo, de modo que, correlacionaram o índice de rugosidade à densidade de drenagem, onde, valores acima de 0,5 km/km² de densidade de drenagem e valores elevados do índice de rugosidade são condizentes, além de indicarem que as bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) podem apresentar tendências a inundações em eventos extremos de cheia.

5.2 MODELAGEM COM O MODELO SWAT

5.2.1 Sub-bacias hidrográficas e Unidades de Resposta Hidrológicas (URHs)

A partir do modelo digital de elevação (MDE) e da rede de drenagem relativa ao MDE, tornou-se possível delimitar a bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO), assim como as sub-bacias hidrográficas da mesma. De acordo com a delimitação, a bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) possui oito sub-bacias. A Figura

5.2.1 apresenta as sub-bacias que compõe as bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).

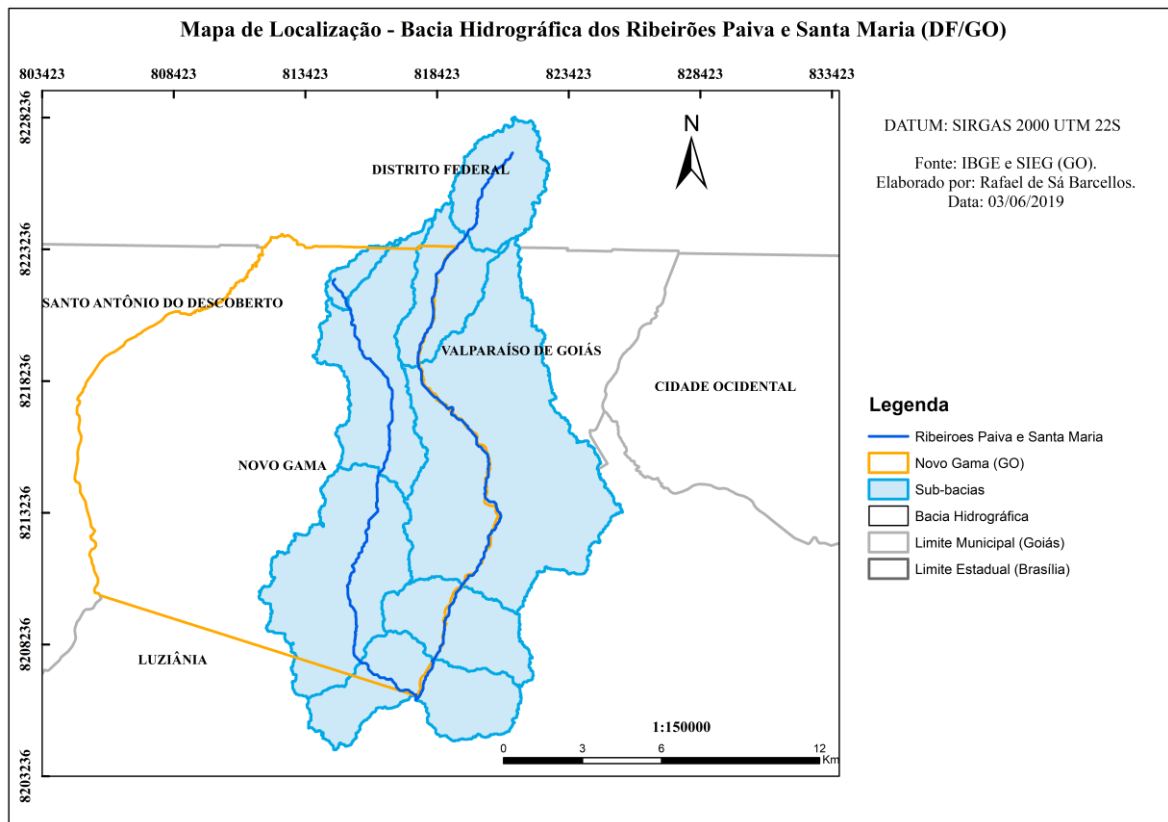


Figura 5.2.1 Mapa de localização das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria. A partir dos valores dos mapas de declividade, pedológico e de uso e ocupação do solo, que constam, respectivamente, nos itens 4.1.3, 4.1.5 e 4.1.7 do presente trabalho, o modelo SWAT gerou 147 Unidades de Resposta Hidrológicas (URHs).

5.2.2 Simulação Inicial

Os resultados iniciais da aplicação do modelo SWAT para as bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria, correspondendo a simulação sem calibração, estão dispostos na Figura 5.2.2.

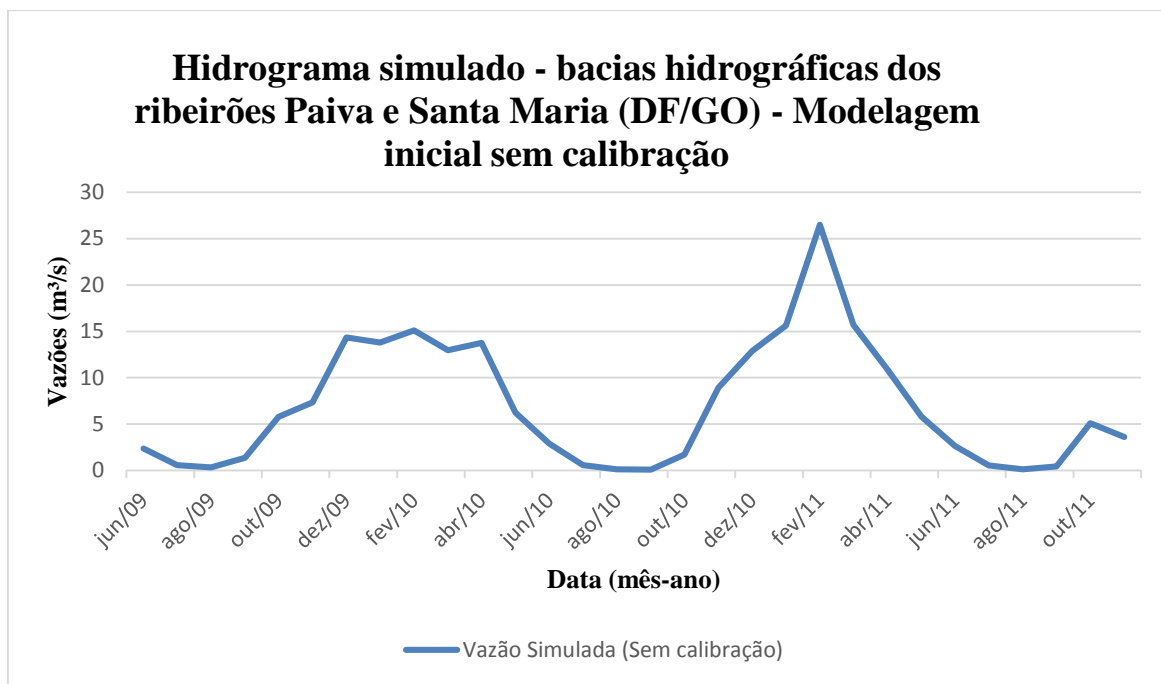


Figura 5.2.2 Hidrograma simulado inicialmente das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO)

Por se tratar de uma simulação ausente de calibração, o valor do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) foi de -1,42. De acordo com Moriasi *et al.* (2007) o valor encontrado do NSE para a simulação é classificado como insatisfatório. Salienta-se que o valor de NSE obtido reforça a necessidade de calibração do modelo, visto que, a partir da análise do hidrograma ilustrado pela Figura 5.2.2, os valores simulados apresentam grandes picos, ilustrando que para simulações ausentes de calibração o modelo SWAT tende a superestimar eventos de cheia e subestimar eventos de seca ou recessão – visto os valores de vazão nulos retornados pela simulação.

5.2.3 Análise de sensibilidade

Conforme explicitado no item 4.4.1 do presente trabalho, o processo de calibração do modelo SWAT fora realizado a partir dos parâmetros sugeridos por Ferrigo (2014). A simulação inicial do modelo SWAT, ausente de calibração, permitiu identificar os parâmetros mais sensíveis do modelo, onde, tais parâmetros seriam usados posteriormente para o processo de calibração.

Assim, a partir da calibração realizada a partir dos parâmetros propostos por Ferrigo (2014) obteve-se a análise de sensibilidade global fornecida pelo SWAT-CUP. Além da análise de sensibilidade global, obteve-se o hidrograma da calibração, permitindo a comparação com a simulação inicial. As Figuras 5.2.3 e 5.2.4 apresentam, respectivamente, os hidrograma para

comparação da simulação sem calibração e com calibração, e o resultado da análise de sensibilidade do modelo SWAT para as bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).

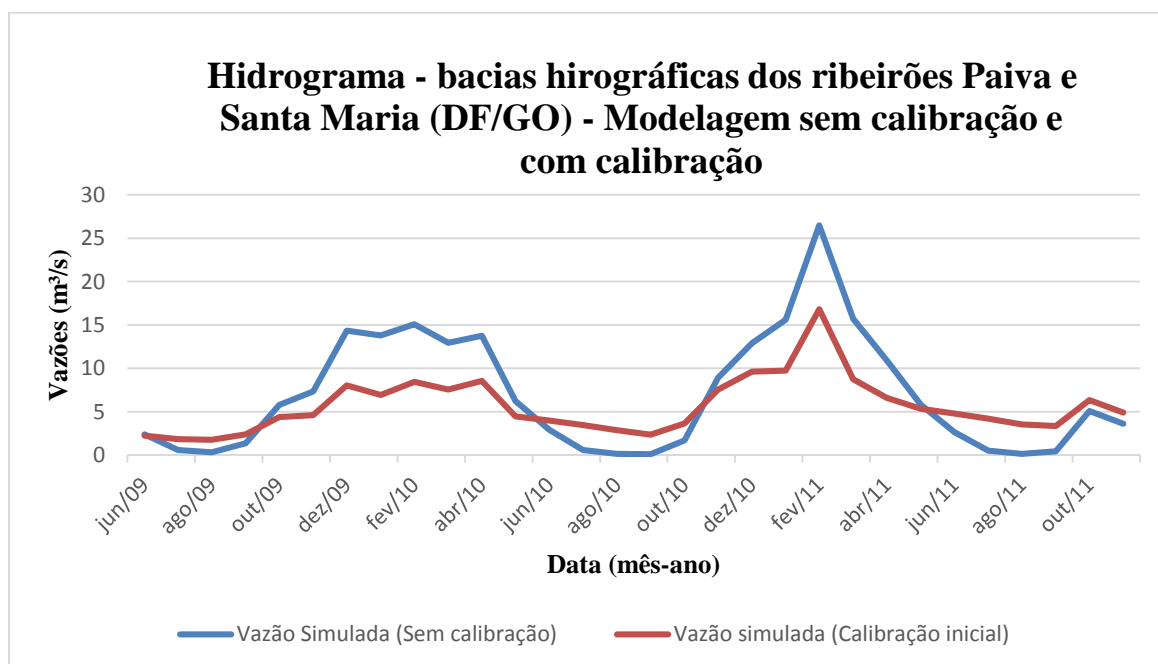


Figura 5.2.3 Hidrograma obtido na calibração inicial da bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).

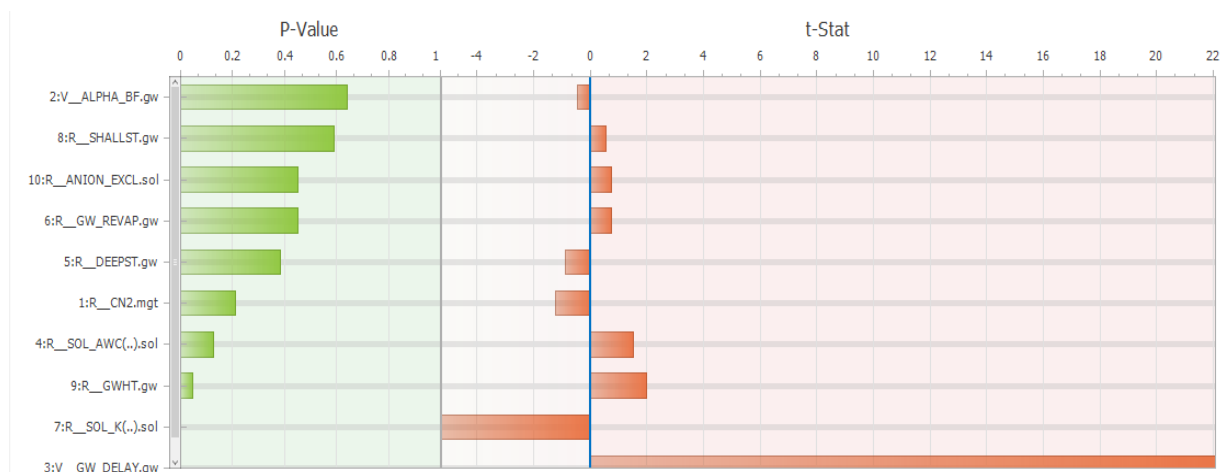


Figura 5.2.4 Resultados da Análise de sensibilidade do modelo SWAT para as bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).

A partir da análise da Figura 5.2.4, pode-se inferir que os parâmetros mais sensíveis do modelo, em ordem crescente, são: SOL_K, CN_2, DEEPST, ALPHA_BF, SHALLST, ANION_EXCL, GW_REVAP, SOL_AWC, GWHT e GWDELAY.

Abbaspour (2013) afirma que valores de “p-value” próximos a zero indicam uma maior sensibilidade do parâmetro, de modo que, ao atingir a nulidade, o parâmetro pode ser dito

como o mais sensível. Os valores obtidos de “*p-value*”, para os parâmetros explicitados pela Figura 5.2.3 encontram-se dispostos na Tabela 5.2.1.

Tabela 5.2.1 Valores de *p-value* obtidos na calibração inicial

Parâmetro	<i>p-value</i>
SOL_K	0
GW_DELAY	0
GWHT	0,052
SOL_AWC	0,125
CN_2	0,212
DEEPST	0,382
GW_REVAP	0,45
ANION_EXCL	0,452
SHALLST	0,588
ALPHA_BF	0,643

Assim, diante do exposto pela Tabela 5.2.1 e do que fora estabelecido por Abbaspour (2013), pode-se concluir que a ordem de sensibilidade dos parâmetros, do menos sensível ao mais sensível, é: ALPHA_BF, SHALLST, ANION_EXCL, GW_REVAP, DEEPST, CN_2, SOL_AWC, GWHT, SOL_K e GW_DELAY. Os parâmetros citados foram descritos por Arnold *et al.* (2012) no manual do modelo SWAT e, encontram-se brevemente descritos abaixo.

O parâmetro GW_DELAY, mais sensível para o presente estudo, é dito como o parâmetro que contabiliza o número de dias necessário para que ocorra a recarga do aquífero. O parâmetro SOL_K retorna, a saturação do solo frente a condutividade hidráulica, sendo expressa em milímetros (mm) por horas (h). O parâmetro GWHT retorna a altura inicial da recarga do aquífero. O parâmetro SOL_AWC denota a capacidade de água disponível, sendo expressa em unidades iguais a do parâmetro SOL_K. O parâmetro CN_2 atribui a curva número para a condição de umidade da bacia hidrográfica, expresso sem unidade (adimensional). O parâmetro DEEPST retorna a profundidade inicial em que ocorre a recarga profunda do aquífero, sendo expressa em milímetros (mm) de água (H₂O). O parâmetro GW_REVAP é adimensional, sendo um coeficiente que expressa o retorno da água até a zona de saturação do solo. O parâmetro ANION_EXCL é responsável por relatar a porosidade no solo. O parâmetro SHALLST é similar ao parâmetro DEEPST, todavia, retorna à profundidade inicial em que ocorre a recarga do aquífero raso. Por fim, o parâmetro ALPHA_BF retorna o número de dias necessários para a recessão do escoamento de base.

5.2.4 Calibração

Após a aplicação inicial do SWAT-CUP, que permitiu tomar ciência dos dez parâmetros mais sensíveis para a calibração, procedeu-se ao “teste inicial de calibração” da bacia do ribeirão Santa Maria (contemplando a área das duas bacias estudadas – bacias dos ribeirões Paiva e Santa Maria) a partir dos dados regionais de vazão, para uma mínima correção dos erros iniciais do modelo SWAT em bacias hidrográficas na região do Distrito Federal.

Previamente à calibração, fora realizada a etapa de análise e comparação dos dados de vazões provenientes de bacias hidrográficas que atendessem ao que fora estipulado no item 4.4.1 do presente trabalho. As estações fluviométricas selecionadas, que apresentam características relativas à bacia hidrográfica, área de drenagem e coordenadas, estão explicitadas pela tabela abaixo.

Tabela 5.2.2 Estação fluviométricas verificadas próximas às bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).

Código da Estação	Nome da Estação	Área (km ²)	Coordenadas	
			X	Y
60444100	Alagado Montante Corumbá	520,3	-481.489	-16,0969
60491000	Cachoeirinha	99,84	-476.853	-160.356
60492000	Santana	144,42	-477.442	-160.508
60443830	Ponte Alta	181,63	-481.361	-160.372
60444035	Alagado	45,3	-480.822	-160.467

O hidrograma comparativo entre as vazões das estações apresentadas na Tabela 5.2.2 encontra-se na Figura 5.2.5

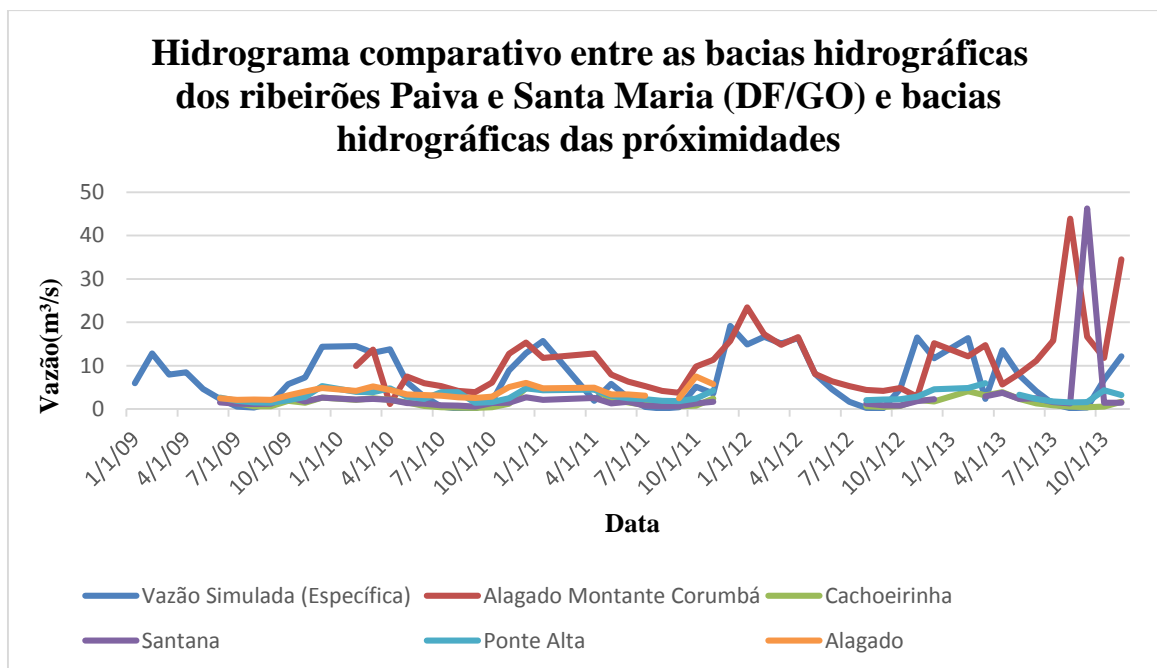


Figura 5.2.5 Hidrograma comparativo entre a vazão simulada sem calibração e as vazões das bacias hidrográficas Alagado Montante Corumbá, Cachoeirinha, Santana, Ponte Alta e Alagado.

Os dados escolhidos para a calibração foram os dados da bacia hidrográfica do rio Ponte Alta. A escolha para tal justifica-se pelo fato da estação fluviométrica presente na bacia apresentar o mínimo de dois anos de dados de vazão, além disso, a bacia possui uma área semelhante à da bacia hidrográfica do presente estudo, de modo a ser uma característica de suma importância frente aos valores de vazão que seriam simulados pelo modelo SWAT. Assim, foram utilizados os dados de vazão da estação fluviométrica Ponte Alta (código 60443830) dos anos de 2009 a 2011.

Araujo (2013) apresenta a descrição da bacia hidrográfica do ribeirão Ponte Alta. A bacia insere-se em uma área de classificação climática de Koppen-Geiger do tipo clima tropical (Aw), marcado pela presença de solos das classificações latossolo vermelho, latossolo vermelho-amarelo e cambissolos háplico (ADASA, 2012). Frente ao uso e ocupação do solo, tem-se o predomínio de áreas urbanizadas e de agricultura. De acordo com o Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal (PGIRH/DF) do ano de 2011, parte expressiva da bacia hidrográfica do ribeirão Ponte Alta sofreu alterações antrópicas, com atuação intensiva da agricultura e expansão urbana. As ocupações urbanas correspondem as regiões Norte, Nordeste e Sudoeste da bacia hidrográfica e as porções em vermelho indicam ação fotossintética da vegetação. (Figura 5.2.6).

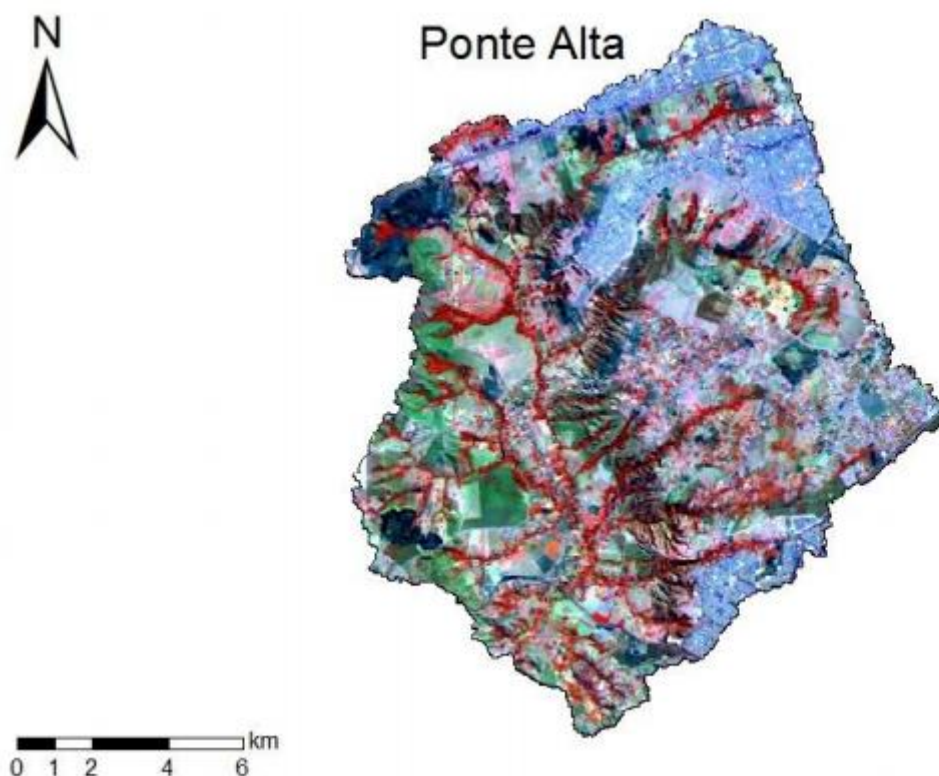


Figura 5.2.6 Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do ribeirão Ponte Alta (DF). Fonte: PGIRH/DF, 2011.

A Figura 5.2.7 apresenta a precipitação média mensal para a bacia hidrográfica do rio Ponte Alta, sendo um dado fundamental que permite inferir que o padrão de precipitações se enquadra na dinâmica das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).

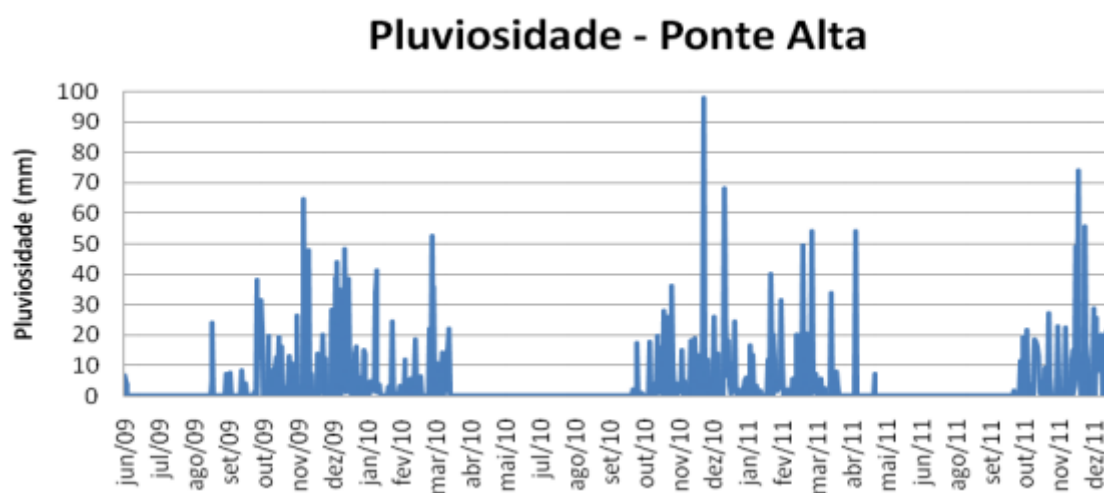


Figura 5.2.7 Precipitação média mensal da bacia hidrográfica do ribeirão Ponte Alta (DF)

A calibração foi realizada conforme descrito pelo item 4.3.1 do presente trabalho, onde obteve-se os novos valores dos dez parâmetros mais sensíveis indicados pela análise de sensibilidade, e novos valores de vazão simuladas permitindo a comparação através de um hidrograma do comportamento com os valores simulados observados. A Tabela 5.2.3 apresenta as faixas máximas e mínimas dos parâmetros mais sensíveis após o teste de calibração.

Tabela 5.2.3 Valores máximos e mínimos dos parâmetros mais sensíveis após a melhor calibração

Parâmetro	Valor	
	Mínimo	Máximo
SOL_K	-0,90438	-0,890518
CN_2	-0,299437	-0,299771
DEEPST	142,500763	189,311462
ALPHA_BF	0,00017	0,000512
SHALLST	2980,570313	3026,163574
ANION_EXCEL	0,325782	0,375154
GW_REVAP	0,083361	0,095893
GW_DELAY	146,059753	153,761658
GWHT	0,144952	0,32097
SOL_AWC	0,052693	0,068045

O SWAT-CUP, além dos valores máximos e mínimos de intervalo, retorna os valores ideais dos parâmetros mais sensíveis de modo a se obter a melhor calibração. Os valores da melhor calibração, em conjunto com os valores dos parâmetros da melhor calibração obtida por Ferrigo (2014) encontram-se na Tabela 5.2.4

Tabela 5.2.4 Parâmetros obtidos após a calibração final (melhor calibração) comparados com os valores obtidos por Ferrigo (2014)

Parâmetro	Valor da melhor calibração	Valor da melhor calibração (Ferrigo, 2014)
CN2	-0.299604	-0.2329
ALPHA_BF	0.000341	0.3885
GW_DELAY	149.910706	835,151
SOL_AWC	0.060369	-0.18135
DEEPST	165.906113	1184
GW_REVAP	0.089627	0.0187
SOL_K	-0.897449	-1.8887
SHALLST	3003.366943	2926.228
GWHT	0.232961	14.8761

ANION_EXCL	0.350468	0.2156
------------	----------	--------

Analisando os valores supracitados pelas Tabelas 5.2.3 e 5.2.4, infere-se que todos os parâmetros se encontram dentro das faixas propostas por Ferrigo (2014). Além disso, através das análises do parâmetro GW_DELAY, infere-se que a bacia hidrográfica do presente estudo apresenta a recarga do aquífero após 40% dos dias corridos de um ano normal, representando o tempo necessário para que ocorra a transição de épocas de seca para épocas de chuva.

A Figura 5.2.8 apresenta o hidrograma comparativo das simulações realizadas com o modelo SWAT, apresentando a transição entre a simulação sem calibração, o teste de calibração inicial e a melhor calibração (denominada de calibração final) obtida com os ajustes feitos no SWAT-CUP.

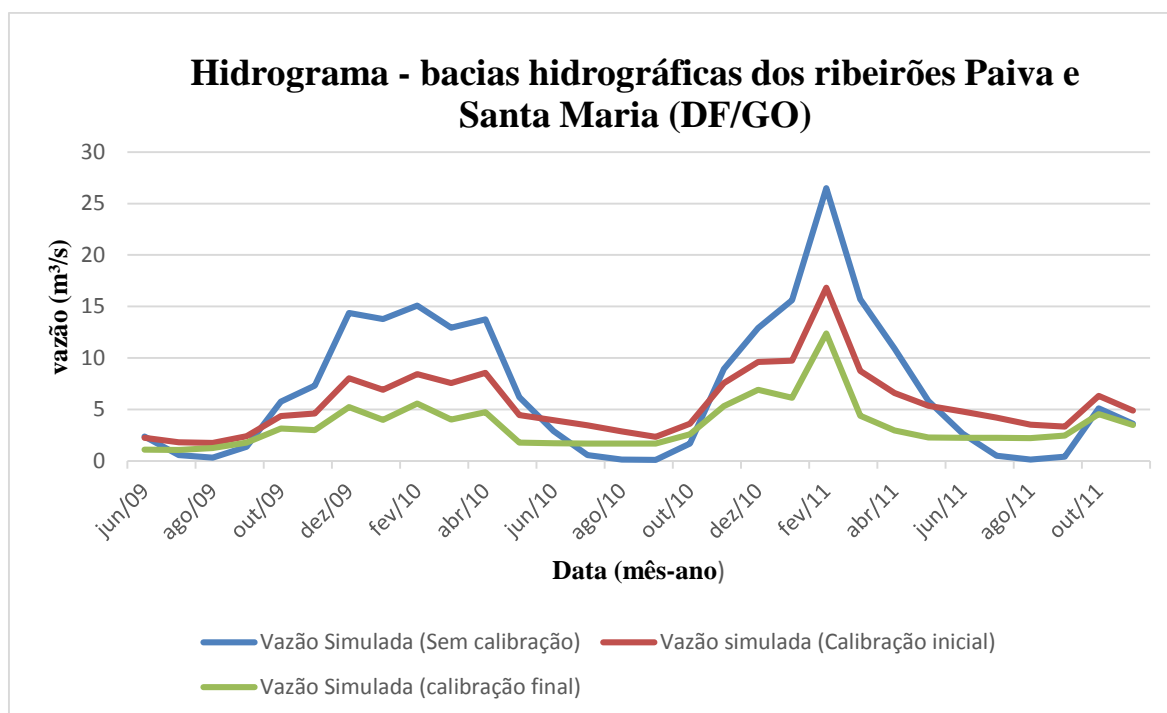


Figura 5.2.8 Hidrograma - bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO)

Durante o processo de calibração, foram realizadas 16 iterações, onde cada iteração correspondia ao número de 1000 simulações. O valor de NSE obtido para a calibração final, que corresponde a última iteração realizada, fora de 0,30. Em comparação com o valor da calibração inicial, infere-se que houve grande melhora, dado que o SWAT-CUP conseguiu um melhor ajuste saindo de um valor de -1,42 para 0,30, todavia, o valor ainda é considerado como insatisfatório de acordo com Moriasi *et al.* (2007). A partir da análise da figura 5.2.6,

nota-se a grande complexidade de ajustes necessários para que uma melhor resposta ocorra, embora a calibração tenha sido insatisfatória.

Os resultados insatisfatórios obtidos podem ser justificados por diversos fatores, mas dentre eles: a complexidade dos processos da bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO); os dados de vazão escolhidos para a calibração não serem adequados apesar da grande proximidade de área entre a bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) e bacia hidrográfica Ponte Alta; grande distinção morfométrica dos parâmetros de classe hipsométrica, que, de acordo com Christofolleti (1980) são parâmetros de grande influência na dinâmica das vazões de bacias hidrográficas; falhas computacionais em virtude do elevado número de iterações realizadas; erros dos valores de vazões mensais fornecidos pela estação fluviométrica Ponte Alta (código 60443830).

5.2.5 Simulações com calibração

Através do exposto no item anterior, tem-se conhecimento de que a melhor calibração ocorreu para a décima sexta iteração. A partir dos resultados da décima sexta iteração, o modelo SWAT foi executado novamente. Os resultados de vazão simuladas pelo modelo encontram-se dispostos na Figura 5.2.9.

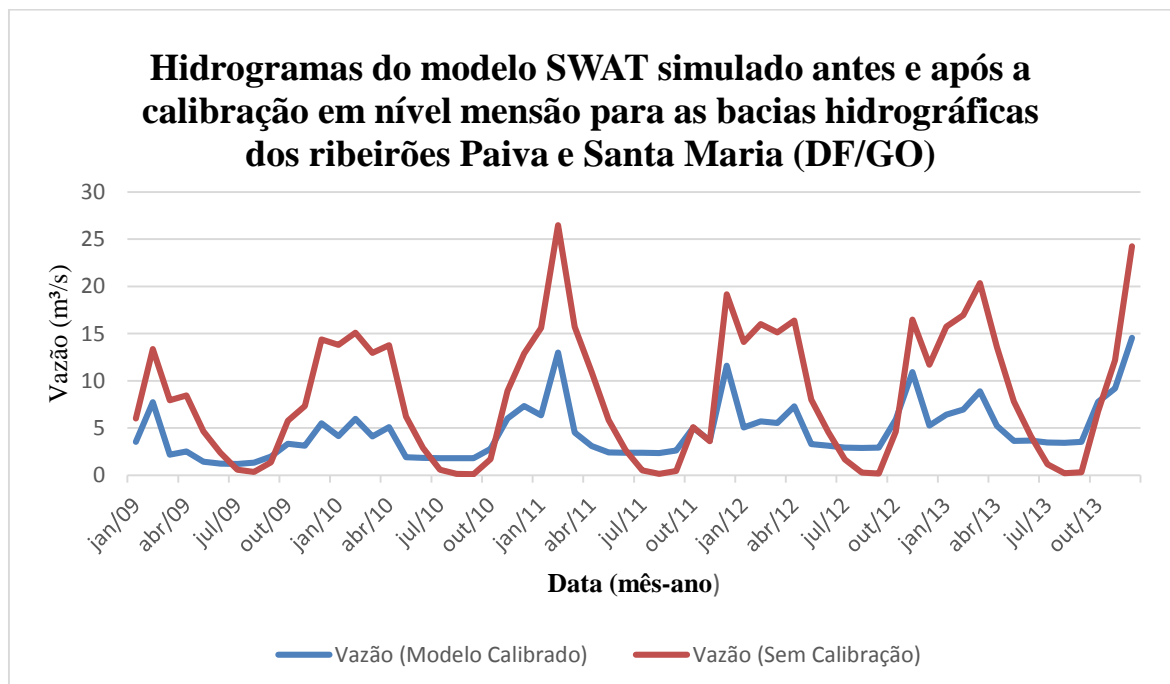


Figura 5.2.9 Hidrograma - bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO)

A partir da análise da Figura 5.2.9, conclui-se que os valores superestimados e subestimados pelo modelo SWAT, a partir do teste de calibração realizado, foram eliminados, de modo a consolidarem melhor os valores de vazão obtidos, representando de maneira mais realista o

comportamento das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO). Os valores mínimos e máximos de vazão simuladas pelo modelo, quando executado sem calibração, foram, respectivamente, 0,13 m³/s e 26,3 m³/s. Com o modelo calibrado, os valores de vazão mínima e máxima, foram, respectivamente, 1,79 m³/s e 14,75 m³/s. Com isso, infere-se que, embora a bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) apresente períodos de recessão entre os meses de julho à outubro, a vazão na bacia não chega ao zero absoluto, de modo que o escoamento na bacia é constante, não apresentando períodos intermitentes em função da variabilidade climática.

5.2.6 Cenários

Os cenários simulados obtiveram o intuito de compreender melhor o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) frente à preservação e ocupação humana exacerbada. Os resultados das simulações dos cenários foram compatibilizados em um único hidrograma que contém a vazão simulada após a calibração, considerando a situação atual da bacia hidrográfica e as vazões simuladas para os dois cenários explícitos no item 4.4.2. Além do hidrograma, fora gerado o balanço hídrico pelo modelo SWAT. A Figura 5.2.10 apresenta o hidrograma comparativo entre a condição atual das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO)

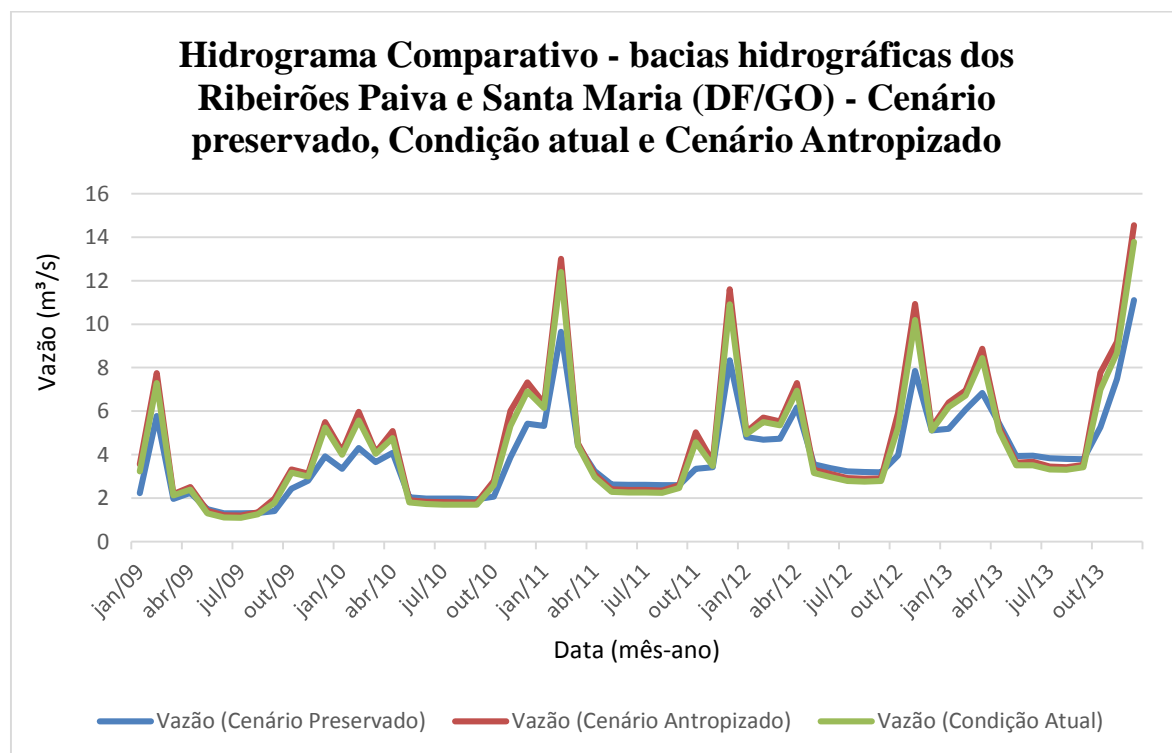


Figura 5.2.10 Hidrograma - bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO)

Através da análise da Figura 5.2.10, pode-se inferir que a simulação apresentou comportamento distinto do esperado. Os valores de vazão, para o cenário preservado, mostram-se superiores à condição atual e ao cenário antropizado apenas em períodos de recessão, caracterizado por níveis de precipitação menores. Em função do cenário antropizado e da condição atual da bacia hidrográfica apresentarem parcialmente ou nenhuma cobertura vegetal no solo, ocorre menos infiltração, de modo que a vazão que escoar superficialmente aumenta, sendo, assim, uma justificativa para os valores de vazão apresentados pela condição atual e o cenário antropizado serem maiores do que o cenário preservado.

As poucas distinções dos valores de vazão entre o cenário antropizado e a condição atual da bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) podem ser justificadas pelo uso e ocupação do solo. De acordo com a figura 5.2.8, infere-se que a bacia hidrográfica é regida em caráter majoritário por atividades agrícolas e áreas de ocupação urbana, logo, ao realizar a substituição dos demais tipos de uso e ocupação por áreas urbanas, espera-se que o comportamento se aproxime da condição atual.

Deve-se salientar que a simulação, considerando os três cenários, não possui representatividade em função dos valores de vazão serem muito próximos. Para a verificação dos valores de vazão quanto à sua validade, observou-se o balanço hídrico das três simulações. As Figuras 5.2.11, 5.2.12 e 5.2.13 apresentam, respectivamente, os balanços hídricos para os cenários antropizado, preservado e a condição atual das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).

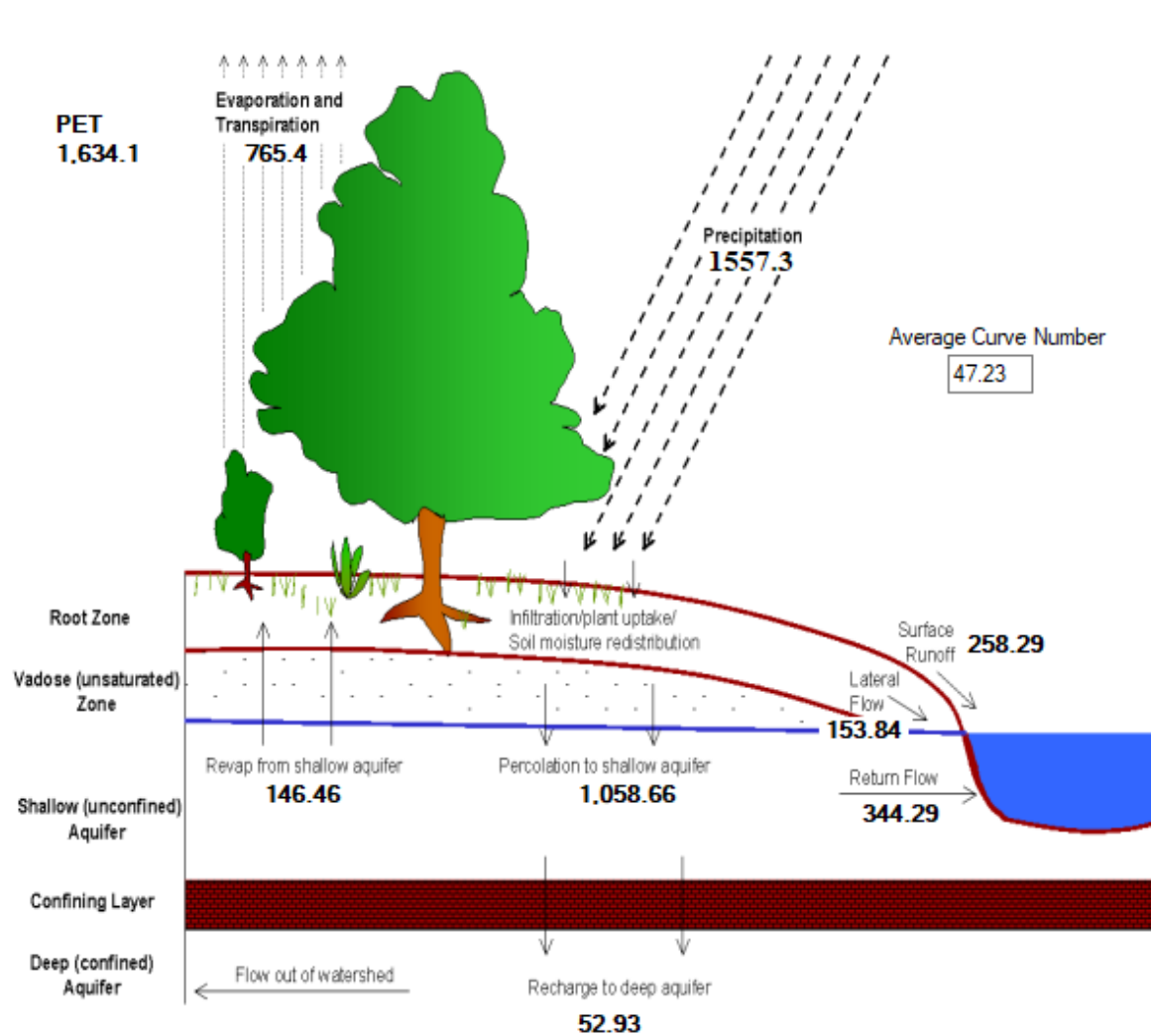


Figura 5.2.11 Balanço hídrico do cenário antropizado das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO).

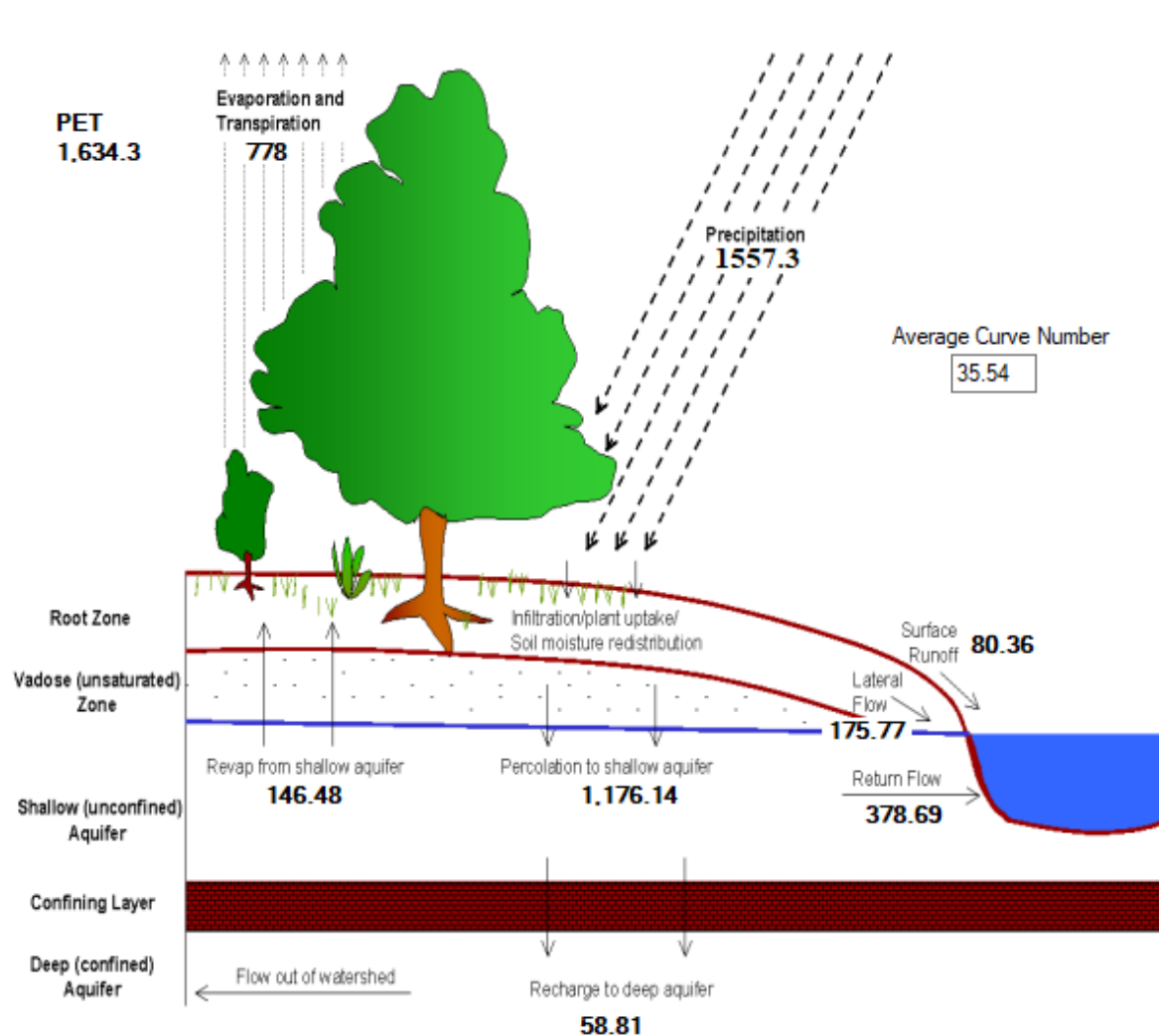


Figura 5.2.12 Balanço hídrico para o cenário preservado da bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO)

Comparando o balanço hídrico do cenário antropizado (Figura 5.2.11) com o cenário preservado (Figura 5.2.12), infere-se que ocorreu um aumento do valor de evapotranspiração, sendo um resultado esperado pelo aumento da cobertura vegetal. Todavia, os valores de infiltração do solo para o cenário preservado foram maiores que o cenário antropizado, sendo um comportamento não esperado. Por fim, os valores do escoamento superficial para o cenário antropizado são maiores que o cenário preservado, demonstrando a influência que a cobertura vegetal tem frente ao balanço hídrico. Diante disso, evidencia-se que um cenário de expansão urbana acarretaria a modificação do balanço hídrico, de maneira a aumentar seu escoamento superficial, com isso, tornam-se necessárias medidas de gestão ambiental em função dos possíveis impactos que seriam gerados.

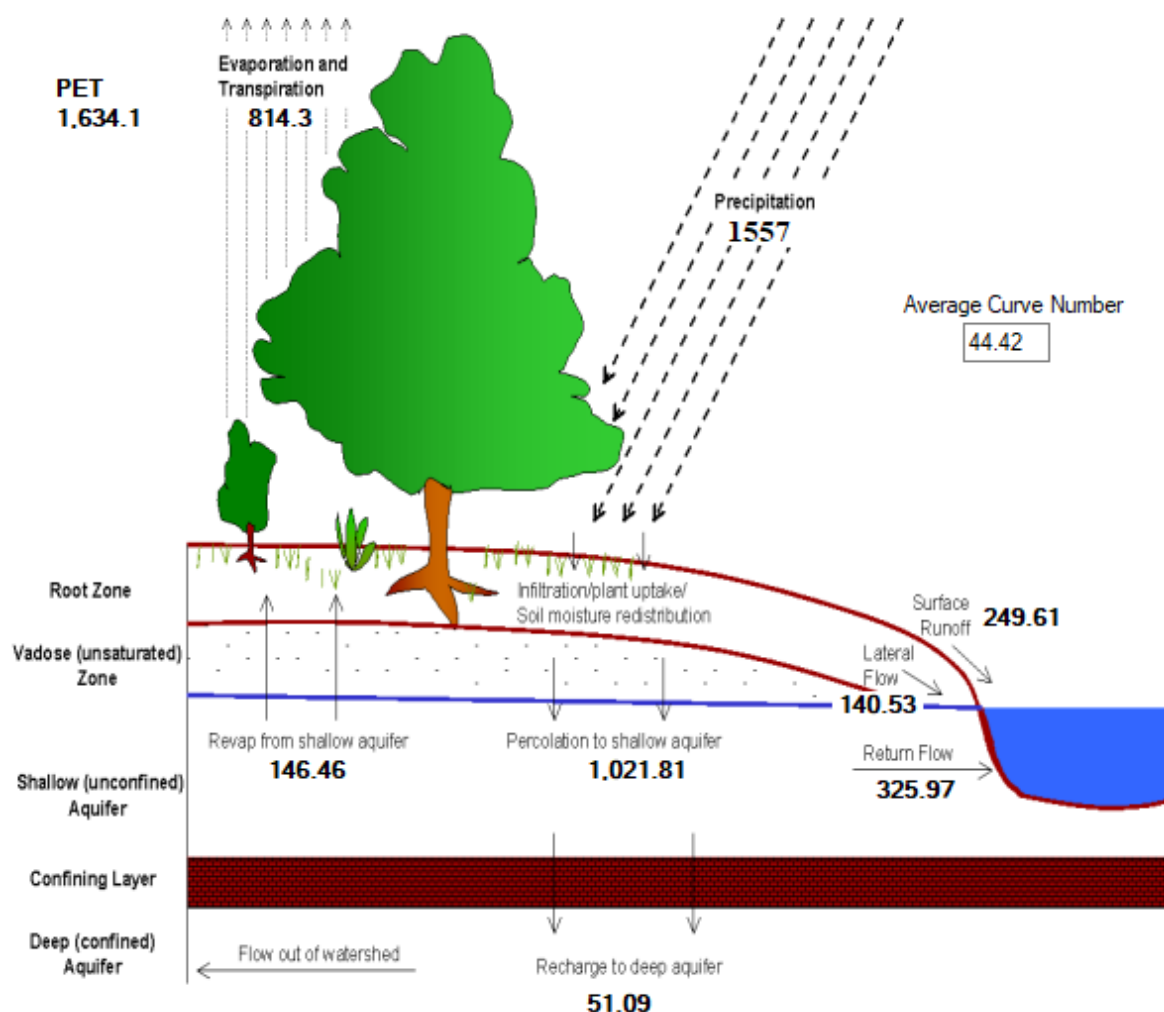


Figura 5.2.13 Balanço hídrico da condição atual da bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO)

A condição atual da bacia, quando comparada com o cenário preservado, apresentou um comportamento peculiar. Tal comportamento decorre de sua evapotranspiração ser maior, embora a disponibilidade de cobertura vegetal ser menor. O escoamento superficial, todavia, continuou mantendo valor superior quando comparadas a condição atual da bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) e a simulação de seu cenário preservado. Por fim, o escoamento superficial da condição atual, ao ser comparado com o cenário antropizado, apresenta valor menor. Diante disso, reforça-se que a regularidade do balanço hídrico da presente bacia hidrográfica é função de seu uso e ocupação do solo, demonstrando a necessidade de práticas de manejo visando uma melhor conservação.

6. CONCLUSÕES

O enfoque metodológico adotado no presente trabalho foi importante na geração de informações, em um contexto de abordagem inicial, sobre as bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO). Foi realizada a caracterização ambiental das bacias hidrográficas, incluindo a caracterização morfométrica, e aplicando um modelo hidrológico para geração de informação ambiental e de recursos hídricos de maior relevância para a gestão dessas unidades hídricas.

Em função de as bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) se caracterizarem como não instrumentada e parcialmente instrumentada, respectivamente, e por não apresentarem dados hidrológicos consistentes, considera-se que a aplicação do modelo SWAT, com foco para a utilização do QSWAT, apresentou-se de maneira satisfatória como uma aproximação inicial.

A simulação inicial não permite realizar inferências precisas acerca do modelo, de modo que serve apenas como um referencial para possíveis valores de vazão relativos a bacia hidrográfica a ser estudada, pois o modelo SWAT apresenta uma forte característica de superestimar eventos de cheia e subestimar eventos de recessão. Tal inferência, permite concluir, por conseguinte, que o processo de calibração é fundamental para uma execução satisfatória do modelo SWAT, de modo que a qualidade dos resultados tende a ser melhor com o modelo devidamente calibrado.

Apesar dos resultados obtidos com as simulações apresentarem valores próximos a bacias hidrográficas do Distrito Federal (DF), a exemplo das bacias estudadas por Ferrigo (2014) e Nunes (2016), não é possível afirmar que os valores obtidos apresentam a condição real da dinâmica hídrica da bacia hidrográfica dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO), sendo apenas uma aproximação de seu comportamento real.

A calibração realizada, embora expressiva, fora considerada como insatisfatória de acordo com Moriasi et al. (2007) em função do valor de NSE obtido para a melhor calibração ter sido de 0,30. O processo de calibração automática demonstrou limitações, onde pode-se elencar: a exigência de grande capacidade de processamento, pois as simulações apresentaram grande demora em função do número realizado; conhecimento aprofundado frente aos parâmetros de calibração, tal como das funções objetivo e algoritmos de calibração fornecidos pelo modelo SWAT; e a ampla faixa de valores mínimos e máximos dos

parâmetros de calibração, de modo que variações sutis em seus valores podem corroborar de maneira negativa para a simulação.

Os cenários simulados com o modelo SWAT apresentaram-se de maneira satisfatória, de modo que a partir dos valores do escoamento superficial referente a cada cenário, permitiram concluir que alterações no uso e ocupação do solo alteram diretamente a dinâmica hídrica da bacia. Além disso, que os valores escoados pelo exutório da bacia tornam-se função direta da presença de cobertura vegetal, onde, o cenário antropizado demonstrou que vazões maiores são escoadas, à medida que o cenário preservado demonstrou maior regularidade e menor valor de vazão escoada. Com isso, alerta-se que a expansão urbana, em conjunto a eventos de cheia extrema podem acarretar em diversos ambientais negativos, tal como inundações e seus desdobramentos.

Quanto a morfometria das bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO), tem-se uma área de 179,56 km², apresentando drenagem regular marcada por canais divagantes, sendo uma bacia que apresenta grande tendência a formação de novos cursos d'água e que possui alta capacidade de renovação hídrica em função disso. O valor de densidade de drenagem obtido, de 0,59 km²/km, indica uma possível tendência de inundação nas bacias hidrográficas, tal fato torna-se mais expressivo quando correlacionado com o cenário antropizado das bacias do presente estudo, onde verificou-se uma elevação dos valores de vazão que saem do exutório.

7. RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se a realização de novos estudos relacionados às bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria para ampliar a caracterização ambiental dessas unidades hidrológicas, inclusive com levantamento de dados de campo.

Sugere-se a simulação da bacia hidrográfica do ribeirão Santa Maria (DF/GO) em toda a sua extensão, desde a sua nascente no Distrito Federal até a foz, quando o ribeirão deságua no Rio Corumbá (GO).

As bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria são caracterizadas pela precariedade ou ausência de monitoramento de dados hidrológicos. Servem de exemplo da diferença marcante entre a riqueza de dados hidrológicos disponíveis no Distrito Federal e a ausência de monitoramento das áreas das bacias hidrográficas localizadas a jusante da divisa entre o Distrito Federal e o Estado de Goiás. Por essa razão, sugere-se a instalação de uma ou mais estações de monitoramento hidrológico na bacia, de vazão e de qualidade da água, para que o conhecimento hidrológico sobre essas bacias possa ser ampliado.

Recomenda-se a obtenção de dados monitorados de vazão e de qualidade de água para que a aplicação de modelos hidrológicos para estudos de bacias possa dispor de dados para o processo de calibração e verificação.

Além da questão mais importante, que é a necessidade de obtenção de dados monitorados, recomenda-se que estudos futuros para as bacias hidrográficas dos ribeirões Paiva e Santa Maria (DF/GO) sejam realizados utilizando a calibração dos outros algoritmos elencados no presente trabalho no item 3.5.3. Recomenda-se que, a calibração seja realizada, também, através da técnica de regionalização de vazões estabelecida por Tucci (2002).

Sugere-se a realização de simulações hidrológicas com o modelo SWAT contemplando, também, a questão do lançamento de cargas orgânicas na bacia.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASPOUR, K.C. (2013) *SWAT-CUP2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs—a user manual*. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 103 p.
- ADRIOLO, M. V. et. al. (2008). *Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos*. Simpósio Brasileiro Sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, 6, 1-18.
- Almeida, L., Serra, J. C. V. (2017). *Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas*. Revista FAE (Curitiba), 20(01), 129-137.
- Almeida, R. A., Pereira, S. B., Pinto, D. B. F. (2018). *Calibration and validation of the SWAT hydrological model for the Mucuri river basin*. Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering, 38(01), 55-63.
- Andrade, W. L. de A., Montenegro, S. M. G. L., Lima, J. R. S., Montenegro, A. A. A., Srinivasan, W. (2017). *Análise de sensibilidade de parâmetros do modelo SWAT em uma sub-bacia da região Nordeste, Brasil*. Revista Brasileira de Geografia Física, 10(2), 440-453.
- ARNOLD, J. G. KINITY, J. R. SRINIVASAN, R. WILLIAMS, J. R., HANEY, E.B. NEITSCH, S. L. (2012b). *Input/Output Documentation Version 2012*. Texas Water Resources Institute. p. 650.
- Beserra, P. S. (2016). *Avaliação dos efeitos das alterações na cobertura e uso do solo sobre o regime de vazões via modelagem hidrológica considerando incerteza paramétrica*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128p.
- BRASIL. Constituição (1997). Lei nº 9433, de 08 de janeiro de 1997. *Política Nacional de Recursos Hídricos*

- Bressiani, D. A.; Gassman P. W.; Fernandes, J. G.; Garbossa L. H. P.; Srinivasan R.; Bonumá, N. B.; & Mendingo, E. M. (2015). *Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects*. Int. J. Agric. & Biol Eng, 8(3): 9-35.
- Calil, P. M., Oliveira, L. F. C. de, Kliemann, H. J., & Oliveira, V. A. (2012). *Caracterização geomorfológica e do uso do solo da Bacia Hidrográfica do Alto Meia Ponte, Goiás*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 16(04), 433-442.
- Camargo, A. P. (2005). *A água no solo para agricultura*. O agrônomo, São Paulo, 57(1), 10-11.
- Castro, K. B. (2013). *Avaliação do Modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, DF, 122p.
- COSTA, M.S. (2018). *Aplicação do modelo QSWAT na simulação hidrológica da bacia hidrográfica do córrego Chapadinha/DF*. Monografia de Projeto Final, Publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 57 p.
- Felizardo, L. M. (2016). *Aplicação de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para modelagem de eventos críticos de vazão em uma microbacia urbana*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP. 99p.
- Ferrigo, S. (2014). *Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – Estudo de caso da bacia do lago Descoberto – DF*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 164p.
- Ferrigo, S. (2018). *Modelagem hidrológica da bacia do Alto Descoberto* (Documento técnico), Brasília, DF, Agência Reguladora de águas, Energia e Saneamento do

Distrito Federal.

- Filho, G. M. M., Andrade R. S., Junior, J. C. Z., Filho, L. N. L. M. (2012). *Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades*. Revista de Ciências Ambientais (Canoas). 06(02), 35-47.
- Fim, B. M. (2018). *Análises quantitativa e qualitativa das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Rodeador DF/ para avaliação das cargas de poluição*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 107p.
- Lana, C. E., Alves, J. M. de P., & Castro, P. de T. A. (2001). *Análise morfométrica da bacia do Rio do Tanque, MG - Brasil*. Rem: Revista Escola de Minas, 54(2), 121-126.
- Leite, M. E., Rocha, A. M. (2015). *Sistemas de Informações Geográficas (SIG) Aplicado ao Cálculo de Índices Morfométricos em Bacia Hidrográfica*. Geo UERJ.
- Lima, L. S. de. (2011). *Implementação de um modelo hidrológico distribuído na plataforma de modelagem dinâmica EGO*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 95p.
- McKnight, T. L. (1996). *Physical geography: a landscape appreciation*. 5ª ed, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J
- Mercuri, E. G. F., Deppe F., Lohmann, M., Simões, K. (2009). *Metodologia da geração de dados de entrada e aplicação do modelo SWAT para bacias hidrográficas brasileiras*. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 4773-4780.
- Mioto, C. L., Ribeiro, V. de O., Souza, D. M. de Q., Pereira, T. V., Anache, J. A. A. & Filho, A. C. P. (2014). *Morfometria de Bacias Hidrográficas Através de SIGs Livres e Gratuitos*. Anuário do Instituto de Geociências, 37(2), 16-22.
- Miranda, R. A. C., Oliveira, M. V. de S., Silva, D. F. (2010). *Ciclo hidrológico planetário: abordagens e conceitos*. Geo UERJ, 01(21), 109-119.
- Noda, F. S. dos S. (2018). *Avaliação do Modelo Soil And Water Assessment Tool (SWAT)*

- na bacia hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Tocantins, Departamento de Engenharia Ambiental, Palmas, TO, 115p.
- Nunes, G. (2016). *Aplicação do modelo SWAT no estudo hidrológico e de qualidade da bacia do lago Paranoá – DF*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 148p.
- Oliveira, G. P. C. (2015). *Modelagem hidrológica apoiada por Sistemas de Informações Geográficas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 86p.
- Perazzoli, M., Pinheiro, A., Kaufmann, V. (2013). *Efeitos de cenários de uso do solo sobre o regime hídrico e produção de sedimentos na bacia do ribeirão Concórdia – SC*. Revista Árvore, 37(5), 859-869.
- Rennó, C. D., Soares, J. V. *Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental (Relatório técnico parcial/2000)*, São José dos Campos, SP, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Santana, D. P. (2003). *Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas*. EMBRAPA, Sete Lagoas, MG, Brasil. 63p.
- Santos, H. G. dos., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C. dos., Oliveira, V. A. de., Lumbreras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A. de., Araujo Filho, J. C. de. & Oliveira, J. B. de. & Cunha, T. J. F. (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5ª ed. EMBRAPA, Brasília, DF, Brasil.
- Santos, R. de C (2002). *Classificação textural aplicada à cobertura do solo de uma bacia hidrográfica usando sensoriamento remoto*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 153p.
- Silva, F. D. M. di. *Aplicabilidade do modelo SWAT na simulação de vazão em bacia hidrográfica do Cerrado utilizando valores de parâmetros regionalizados*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 90p.

- Silva, R. M. da., Henrique, I. G. N., & Cazé, J. F. (2016). *Simulação das mudanças de uso e ocupação do solo e seus efeitos nas características hidrossedimentológicas em uma bacia do Bioma Caatinga*. Revista de Geografia (Recife), 35(01).
- Singh, V. P., Woolhiser, D. A. (2002). *Mathematical Modeling of Watershed Hydrology*. Journal of Hydrologic Engineering, 07(04), 270-292.
- Sousa, W.S., Viana, J. F. S., Silva, R. R. e Irmão, R. A. (2018). *Estimativa do balanço hídrico de uma sub-bacia Hidrográfica do Rio Ipanema com o Modelo SWAT*. Journal of Environmental Analysis and Progress, 03(01), 146-154.
- Tucci, C. E. M. (2002). *Hidrologia: Ciência e Aplicação* (3ª ed.). Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH. p 40-42.
- Tucci, C. E. M., Hespanhol I. & Netto, O. de M. C. (2001). *Gestão da Água no Brasil*. Wertheim, J., Borges, M. D. A. & Cunha, C (Eds). Brasília, DF: UNESCO.
- Viana, J. F. de S; Montenegro S. M. G. L., Silva B. B. da; Silva R. M. da; & Sousa, W. dos S. (2018). *Modelagem hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama-PE utilizando o modelo SWAT*. Journal of Environmental Analysis and Progress, 03(01), 155-172.
- Ward, R. C. & Robinson, M. (2000). *Principles of Hydrology* (4a ed.). McGraw-Hill, Berkshire: England. 450p.